

# **AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA**

im. Stanisława Staszica  
w Krakowie

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
Katedra Mechaniki i Wibroakustyki

mgr inż. Ireneusz Czajka

## **STEROWANIE ROZKŁADEM POŁA AKUSTYCZNEGO GENEROWANEGO PRZEZ ŹRÓDŁA WIELOPUNKTOWE**

Praca doktorska

Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Gołaś

KRAKÓW 2009

# Spis treści

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1. Wstęp, cel i zakres pracy</b>                                                         | 1  |
| 1.1. Cel i zakres pracy                                                                     | 2  |
| <b>2. Opis pola akustycznego</b>                                                            | 4  |
| 2.1. Wprowadzenie                                                                           | 4  |
| 2.2. Fizyczne modele pola akustycznego                                                      | 5  |
| 2.3. Modele abstrakcyjne                                                                    | 7  |
| 2.4. Podsumowanie                                                                           | 11 |
| <b>3. Metody kształtowania charakterystyk kierunkowych źródeł dźwięku</b>                   | 13 |
| 3.1. Wprowadzenie                                                                           | 13 |
| 3.2. Klasyczne metody kształtowania charakterystyk kierunkowych źródeł dźwięku              | 13 |
| 3.3. Współczesne metody kształtowania charakterystyki kierunkowej źródła dźwięku            | 21 |
| 3.4. Podsumowanie                                                                           | 31 |
| <b>4. Algorytmy sterowania kierunkowością wielopunktowych źródeł dźwięku</b>                | 32 |
| 4.1. Wprowadzenie                                                                           | 32 |
| 4.2. Model liniowego źródła rozciągniętego                                                  | 32 |
| 4.3. Rozciągnięte źródło liniowe z liniowym rozkładem fazy drgań                            | 35 |
| 4.4. Układy źródeł dyskretnych                                                              | 42 |
| 4.5. Uwarunkowania geometryczne                                                             | 43 |
| 4.6. Uzyskiwanie założonej kierunkowości                                                    | 47 |
| 4.7. Stała charakterystyka kierunkowa                                                       | 49 |
| 4.8. Podsumowanie                                                                           | 55 |
| <b>5. Wpływ kierunkowości źródła na rozkład pola akustycznego</b>                           | 56 |
| 5.1. Wrażliwość parametrów pola akustycznego na zmiany charakterystyk kierunkowych źródła   | 56 |
| 5.2. Sterowanie rozkładem pola akustycznego przez zmianę charakterystyki kierunkowej źródła | 61 |
| <b>6. Badania eksperymentalne</b>                                                           | 67 |
| 6.1. Eksperyment cyfrowy                                                                    | 67 |
| 6.2. Wyznaczanie charakterystyk kierunkowych na drodze pomiarowej                           | 69 |
| 6.3. Eksperymentalna weryfikacja modelu obliczeniowego                                      | 75 |
| <b>7. Podsumowanie</b>                                                                      | 83 |
| 7.1. Podsumowanie i wnioski                                                                 | 83 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| <b>Bibliografia</b> . . . . . | 85 |
|-------------------------------|----|

## Streszczenie

Trudno jest w życiu współczesnego człowieka przecenić wartość wrażeń słuchowych i związanych z nimi przeżyć emocjonalnych. Dzięki technicznym możliwościom kreowania złożonych pól akustycznych o założonych parametrach. Na każdym w zasadzie kroku stykamy się z przykładami sterowania wybranymi parametrami pola akustycznego w punktach lub niewielkich obszarach.

W tej pracy przez sterowanie rozkładem pola akustycznego rozumie się uzyskiwanie zadanych wartości wybranych wielkości opisujących pole akustyczne (np. ciśnienie akustyczne) w wybranym obszarze. W warunkach rzeczywistych każdy taki obszar jest ograniczony, na potrzeby tej pracy w większości rozpatrywanych przypadków pomija się wpływ brzegu obszaru. Analizy będą przeprowadzane dla pola swobodnego.

Mówiąc o sterowaniu rozkładem pola akustycznego generowanego przez wielopunktowe źródło dźwięku należy odpowiedzieć na pytanie: **Jakie są możliwości sterowania rozkładem tegoż pola.** Rozkład pola akustycznego w wybranym obszarze (ograniczonym lub nie) zależy od umiejscowienia źródeł drgań akustycznych, warunków na brzegu analizowanego obszaru oraz właściwości źródeł. Biorąc pod uwagę sam sposób pobudzania ośrodka do drgań stwierdzamy, że sterowanie rozkładem pola akustycznego może się odbywać na drodze zmiany położenia poszczególnych źródeł składowych lub też na drodze zmiany sygnału transmitowanego przez poszczególne źródła. W niektórych przypadkach można doprowadzić do sytuacji, gdzie na drodze zmian sygnału doprowadzonego do poszczególnych źródeł składowych uzyskuje się efekt pozornej zmiany geometrii układu źródeł. Zmiany sygnałów doprowadzonych do źródeł składowych polegają na zmianie wzmocnień i wprowadzaniu opóźnień. Taka zmiana geometrii prowadzi do zmiany charakterystyki kierunkowości źródła, opisującej przestrzenny rozkład energii promieniowanej przez drgający układ mechaniczny. Zmiana charakterystyki kierunkowości źródła bezpośrednio wpływa na rozkład pola akustycznego w wybranym obszarze przestrzeni.

Zatem istnieje możliwość sterowania rozkładem pola akustycznego na drodze zmian sygnału zasilającego poszczególne źródła składowe wielopunktowego źródła dźwięku.

Praca będzie się koncentrowała na układzie złożonym z kilku lub kilkunastu źródeł rozmieszczonych wzdłuż prostej. Sterowanie rozkładem pola akustycznego będzie się odbywało na drodze modyfikacji sygnału transmitowanego przez poszczególne źródła, co doprowadzi do zmiany kształtu charakterystyki kierunkowości źródła dla danej częstotliwości.

# 1. Wstęp, cel i zakres pracy

W niniejszej pracy podjęto temat kształtowania rozkładu pola akustycznego w wybranym obszarze. Najogólniejszy opis pola akustycznego uzyskiwany jest przy wykorzystaniu równań Naviera-Stokes'a, w zakresie liniowym stosuje się równanie Helmholtza. Rozwiązanie tych równań daje rozkład pola akustycznego przy zadanych warunkach na brzegu. Uzyskany rozkład pola akustycznego zależy głównie od:

- umiejscowienia źródła dźwięku wewnątrz tego obszaru,
- jego właściwości (charakterystyk – głównie zewnętrznej),
- oraz od właściwości samego obszaru podlegającego analizie czyli środowiska wypełniającego go i jego granic.

W większości przypadków medium, którym jest powietrze oraz właściwości obszaru tj. granice, kształt, objętość, impedancja powierzchni ograniczających są ustalone i nie mamy możliwości wpływać na nie. Z tego też powodu sterowanie rozkładem pola akustycznego dla danego obszaru o ustalonych: kształcie, wielkości, charakterze granic oraz wartościach wielkości charakterystycznych sprowadza się do sterowania charakterystykami źródła fal akustycznych.

Najistotniejszą, z naszego punktu widzenia, charakterystyką jest charakterystyka kierunkowa źródła dźwięku, opisująca ilość energii akustycznej promieniowanej w każdym z kierunków wokół źródła. Dzięki modyfikacji charakterystyki kierunkowej można osiągnąć efekt sterowania polem akustycznym – możemy wpływać na ilość energii akustycznej docierającej od źródła do wybranego obszaru. W obszarach ograniczonych problem sterowania komplikuje fakt istnienia odbić fali akustycznej. Zmiany charakterystyki kierunkowej źródła będą wpływać na zrozumiałość mowy, poziom ciśnienia akustycznego czy stosunek sygnału użytecznego do szumu w wybranym obszarze.

Dzięki temu wiele praktycznych problemów było i jest rozwiązywanych poprzez sterowanie charakterystyką kierunkową. Uzyskiwanie efektów estetycznych np. wrażenia przestrzenności dźwięku, którym się zajmował Gardner [18], aktywnej redukcja poziomu dźwięku rozwijanej w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki AGH, nagłaśnianie wyłącznie wybranych obszarów przestrzeni to tylko niektóre z często powracających problemów szeroko pojętej akustyki. W związku z tym na przestrzeni lat wiele prac poświęcono zagadnieniu sterowania rozkładem pola akustycznego przy pomocy źródeł dźwięku.

Najstarsze prace dotyczyły modyfikacji impedancji promieniowania źródła (głównie tuby). Później budowano źródła składające się z pewnej liczby źródeł składowych, które

rozmieszczano wzdłuż prostej w regularnych odstępach[35]. W 1953 roku Pritchard zajmował doborem wzmocnień liniowego układu źródeł punktowych tak by uzyskać optymalną charakterystykę kierunkową. Prace na uzyskiwaniem stałej charakterystyki kierunkowej w wybranym paśmie częstotliwości już w 1957 roku podejmował Tucker. Najczęściej prace z zakresu kierunkowości źródeł koncentrowały się na zakresie ultradźwięków. Ponieważ opis matematyczny wielopunktowych odbiorników pojawiała się pewna ilość prac nawiązujących do kierunkowości odbiorników [28][40] [20][27]. Z uwagi na ograniczenia technologiczne do niedawna prace koncentrowały się na układach dyskretnych. Stosunkowo niedawno (lata 90 ubiegłego wieku) pojawiły się prace sugerujące możliwości budowy źródeł o ciągłych rozkładach drgań [48][3]. Przy czym prace [48] jedynie ogólnie sugeruje możliwość wykorzystania wyników do układu, w którym źródło miałoby postać koncentrycznych pierścieni piezoelektrycznych zasilanych z niezależnych źródeł. Co pozwalałoby na przybliżone uzyskiwanie założonych rozkładów drgań na powierzchni źródła. Antila, Kataja i Valimäki zbudowali źródło w postaci równoległych pasków niezależnie pobudzanych do drgań. Oprócz prac nad źródłami jako przetwornikami mechanoakustycznymi wiele prac omawia zagadnienia uzyskiwania stałej charakterystyki kierunkowej dla pewnego zakresu częstotliwości [27][20][28][40] W 1995 roku Ward, Kennedy i Williamson [44] opublikowali pracę omawiającą teoretyczne podstawy znajdowania rozkładów drgań wzdłuż źródła zapewniające niezmiennosc charakterystyki kierunkowej w paśmie częstotliwości. Niektórzy autorzy stawiają warunki braku listków bocznych [45] przy czym brak informacji o analitycznej metodzie syntezy źródła bez listków bocznych charakterystyki kierunkowej. Chociaż większość autorów zajmuje się źródłami z równomiernie rozłożonymi źródłami składowymi to niektórzy stosują nierównomierne rozkłady [43]. Rozwój metod numerycznych pozwolił na dokładniejsze badanie rozkładów pola akustycznego generowanego przez źródła dźwięku [8][25]. Co pozwala na precyzyjniejsze przewidywanie zachowania projektowanych źródeł w eksploatacji.

Dostępne prace omawiają uzyskiwanie stałej charakterystyki kierunkowej, zmiany kierunku promieniowania dźwięku lub poziomu listków bocznych. Brak jest prac omawiających te zagadnienia wspólnie. Dlatego pojawia się potrzeba dokonania syntezy układu pozwalającego na sterowanie kierunkiem promieniowania źródła i uzyskanie stałej charakterystyki kierunkowej.

## 1.1. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest opracowanie metodyki sterowania charakterystyką kierunkową źródła dźwięku, a tym samym sterowania rozkładem pola akustycznego w wybranym obszarze.

Globalne sterowanie rozkładem pola akustycznego zostanie zrealizowane na drodze sterowania charakterystyką kierunkową wielopunktowego źródła dźwięku. Sterowanie charakterystyką kierunkową odbędzie się na drodze modyfikacji amplitud i przesunięć fazowych drgań poszczególnych źródeł składowych.

Do tej pory podobne rozwiązania stosowano głównie (w zasadzie jedynie) dla zakresu ultradźwięków. Większość prac koncentruje się na uzyskiwaniu stałej charakterystyki kierunkowej dla wybranego pasma częstotliwości – aby uniknąć problemów związanych ze zmianą charakterystyki kierunkowej wraz z częstotliwością. Niewiele prac mówi zaledwie o możliwości uzyskiwania zmiany kierunku maksimum promieniowania.

Aby zrealizować tak postawiony cel konieczne stało się rozwiązanie szeregu problemów cząstkowych:

1. opracowanie analitycznych zależności opisujących charakterystyki kierunkowe wybranych układów akustycznych,
2. opracowanie analitycznych zależności pozwalających na sterowanie charakterystyką kierunkową,
3. weryfikacja numeryczna uzyskanych zależności,
4. badania eksperymentalne zmian charakterystyk kierunkowych przy wprowadzaniu opóźnień do sygnałów doprowadzonych do poszczególnych źródeł.

W zakres pracy wchodzi również opracowanie algorytmu sterowania dla źródła złożonego z kilku źródeł składowych. Algorytm ma pozwalać na zmianę kierunku maksimum promieniowania źródła, oraz zmianę szerokości głównego listka charakterystyki kierunkowej.

W pracy wyprowadzono zależności teoretyczne pozwalające na zbudowanie układu sterowania polem akustycznym przy pomocy wielopunktowego źródła dźwięku oraz opisano i zamieszczono wyniki pomiarów weryfikujących owe zależności.

## 2. Opis pola akustycznego

### 2.1. Wprowadzenie

W wielu dziedzinach nauki, techniki, gospodarki i życia codziennego człowiek posługuje się modelami. Tworzymy modele pozwalające na zrozumienie i opisanie otaczającej nas rzeczywistości. W literaturze [30] wymienia się trzy główne zastosowania modeli: badania naukowe, projektowanie i sterowanie. Zastosowanie modeli do badań naukowych polega na interpretacji wiedzy lub pomiarów otrzymanych w wyniku obserwacji w celu uzyskaniu nowych informacji o obiekcie. Modele zastosowane w projektowaniu służą do symulacji zachowania się konstrukcji. Informacje o różnych wariantach konstrukcji otrzymuje się w wyniku rozwiązywania równań modeli dla poszczególnych wariantów. Umożliwia to zastosowanie optymalizacji wieloparametrowej w celu wyłonienia najbardziej optymalnej konstrukcji (dla zadanej funkcji celu). Nieco odmienne jest zastosowanie modeli w sterowaniu. Pozwala ono na dobór sterowań dla zamodelowanego obiektu, na przewidywanie i analizę stanów awaryjnych, badaniu procesu zatrzymania i rozruchu. Eksperymentowanie na obiekcie rzeczywistym bywa zazwyczaj czasochłonne, kosztowne a czasem niemożliwe, natomiast model pozwala na prowadzenie symulacji badanych procesów. Na obecnym etapie wiedzy najbardziej popularna jest metoda symulacji komputerowej. Wygoda korzystania z tego rodzaju symulacji uzasadniona jest nieingerencją w badany obiekt oraz całkowitą powtarzalnością utrzymanych wyników. Dane z symulacji komputerowej łatwiej jest interpretować i redukować niż dane z eksperymentu na rzeczywistym obiekcie. Podstawową definicję modelu podaną w [33] można wyrazić w taki sposób:

*„Model jest to opis zasadniczych cech istniejącego lub projektowanego układu, dostarczającego wiedzy o nim w formie użytecznej”*

Model jest to zatem teoretyczny opis badania obiektów, które charakteryzuje się następującymi cechami:

- jest pewnym uproszczeniem, idealizacją rzeczywistości,
- jest w sensie pewnego kryterium zbieżny z rzeczywistością,
- jest na tyle prosty, że możliwa jest jego analiza dostępnymi metodami analitycznymi,
- jego analiza dostarcza nam nowej informacji o obiekcie badań.

W klasycznej teorii sterowania modele umożliwiają określanie relacji między sterowaniem a odpowiedzią układu. Praca zajmuje się wpływem charakterystyk kierunkowych źródła dźwięku (sterowanie) na wybrane parametry pola akustycznego (odpowiedź ukła-

du). Konieczne zatem jest wybranie takiego modelu układu *źródło (sterowanie) – obiekt akustyczny – parametry pola akustycznego (odpowiedź układu)*, który będzie najbardziej przydatny w badaniach symulacyjnych.

Wobec tego w tym rozdziale przedstawiona zostanie klasyfikacja metod modelowania pola akustycznego oraz ich krótka charakterystyka. Konieczność stosowania modeli jest oczywista z uwagi na następujące korzyści:

1. dają możliwość modelowania pomieszczeń już istniejących jak i dopiero projektowanych (przypadek drugi umożliwia uzyskanie dużych oszczędności — odpada ewentualność koniecznej po wybudowaniu obiektu adaptacji akustycznej).
2. umożliwiają dowolną zmianę zarówno umiejscowienia jak i charakterystyki źródeł dźwięku, materiałów pochłaniających, izolacyjnych oraz odbiorników
3. pozwalają ocenić wyniki sterowania polem akustycznym

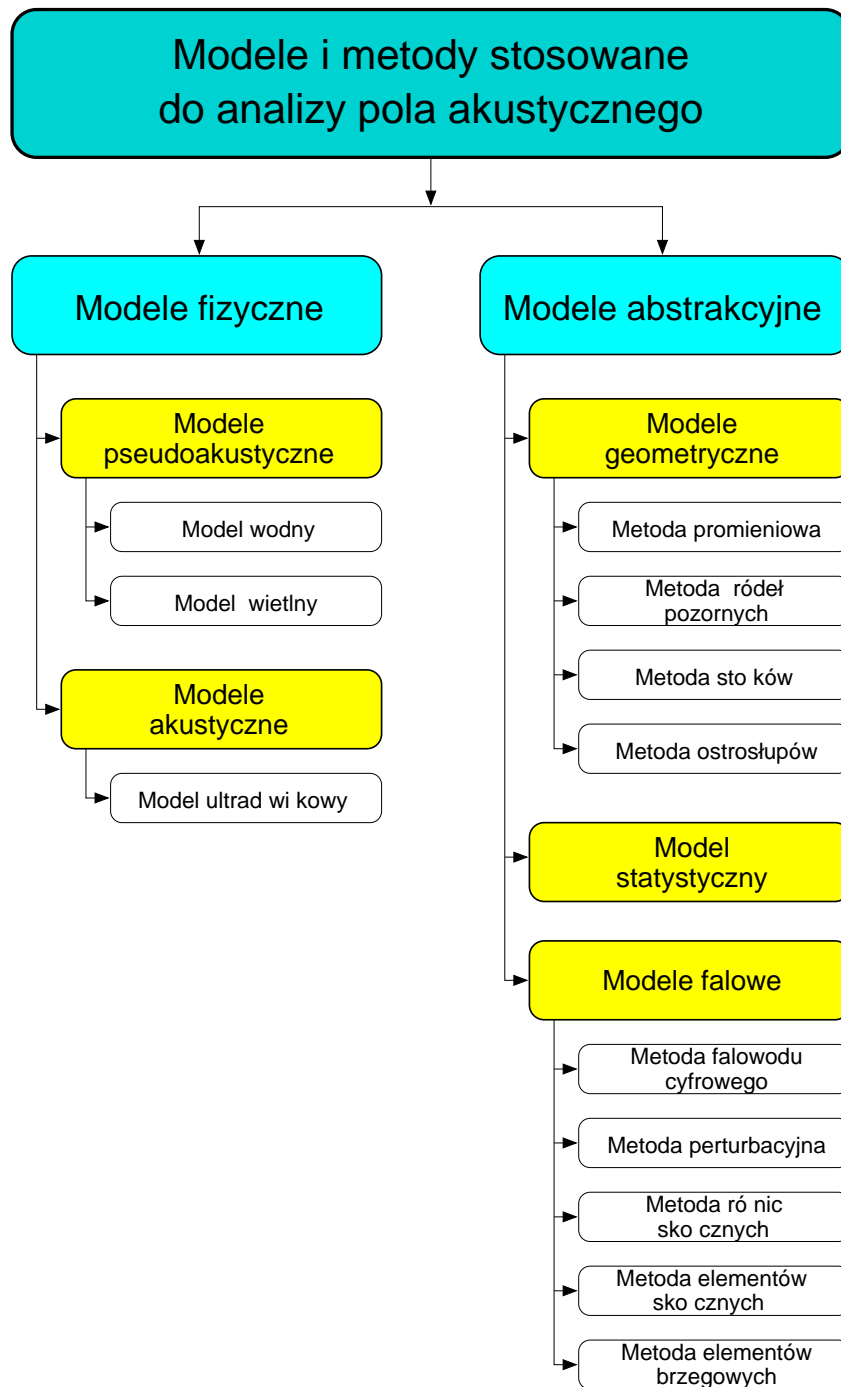
Wymienione cechy zyskują na znaczeniu wtedy, gdy zbudowany zostanie model jak najbliższy rzeczywistości. W świetle tego zrozumiałe staje się poszukiwanie takiego modelu i doskonalenie już istniejących. Niektóre z tych ostatnich odwzorowują już rzeczywistość na tyle wiernie, że stosuje się je do poważnych projektów adaptacji akustycznej.

## 2.2. Fizyczne modele pola akustycznego

Do tej grupy zaliczane są wszystkie modele materialne. Należą do niej: modele pseudoakustyczne, nazywane również analogowymi, które bazują na analogii rozchodzenia się fal w innych ośrodkach oraz modele akustyczne, wykorzystujące fale dźwiękowe.

**Modele wodne** Modelowanie zjawisk zachodzących w polu akustycznym przy pomocy fal wodnych należy obecnie do przeszłości. Tego typu modelowanie jest pomocne w celach demonstracyjnych pozwalających zrozumieć zjawiska jakie zachodzą przy propagacji fal. Metoda ta polega na umieszczeniu w płytkim naczyniu wypełnionym wodą przekroju badanego pomieszczenia. Na powierzchni wody, w miejscach gdzie w modelowanym pomieszczeniu znajdują się źródła dźwięku umieszcza się wibrujące pręty, których zadaniem jest generacja fal wodnych. Fale te, rozchodząc się na powierzchni wody, ulegają odbiciu od ścian przekroju, pozwalając tym samym na obserwację – przez analogię – biegu fal akustycznych w modelowanym przekroju pomieszczenia. Jak wspomniano, metoda jest stosowana w celach demonstracyjnych. Jest to spowodowane trudnościami w realizacji ilościowych parametrów rozchodzenia się fal (takich jak poziom mocy, natężenia, współczynniki pochłaniania itp.) oraz ograniczeniem modelowania tylko do dwóch wymiarów.

**Modele świetlne** Modele te bazują na analogii pomiędzy falami dźwiękowymi i świetlnymi. Rozróżnia się dwie metody: metodę promieni świetlnych i metodę rozproszenia światła. Obydwie oparte są na zjawisku odbicia światła i jako takie należą do przeszłości.



Rysunek 2.1. Modele i metody analizy pola akustycznego[37]

Metoda promieni świetlnych polega na badaniu biegu promieni świetlnych w modelowanym pomieszczeniu i wnioskowaniu na ich podstawie o rozchodzeniu się dźwięku. Źródłem promieni mogą być zwykłe żarówki. Powierzchnie pochłaniające dźwięk modelowane są lustrami, przydymionymi stosownie do wymaganego współczynnika pochłaniania. Funkcję odbiornika pełni fotokomórka umieszczona w miejscu, dla którego chcemy uzyskać informację o poziomie natężenia dźwięku. Parametry akustyczne pomieszczenia kształtuje się przez zmianę natężenia światła, ułożenia i stopnia zadymienia luster. W metodzie rozproszenia światła źródło światła umieszcza się za ekranem o wąskich szczelinach, uzyskując tym sposobem znaczną liczbę wiązek promieni. Jeżeli wewnątrz modelu zostanie wypełnione dymem, to promienie zostaną uwidocznione. W metodzie tej nie są uwzględniane odbicia ale mimo to daje informację o rozkładzie natężenia dźwięku w pomieszczeniu.

**Model ultradźwiękowy** Idea modelowania ultradźwiękowego polega na prowadzeniu w modelu obiektu pomiarów akustycznych, które prowadzi się w obiekcie modelowanym. Modelowanie, oprócz budowy modelu w danej skali, wymaga stosowania przetworników elektroakustycznych, pasm analizowanych częstotliwości, własności pochłaniających modelu i parametrów akustycznych powietrza w tej samej skali. Ten ostatni wymóg rzadko jest spełniany gdyż zamodelowanie warunków pochłaniających dla fali akustycznej w zakresie częstotliwości wynikający ze skali modelu wymaga zmiany czynnika wypełniającego przestrzeń na inny gaz. Najczęściej spotykane skale modelu to 1:10 do 1:100, dlatego też pozostałe wymagania stwarzają trudności w realizacji. Dla modelu w skali 1:100 badanemu pasmu 1 Hz do 10 kHz odpowiada zakres 100 Hz do 1 MHz. Z tego powodu stosuje się modele o mniejszej skali np. 1:20 i ogranicza się badane pasmo do 5 kHz. Mimo tych zabiegów górna granica częstotliwości modelu osiąga wartość 100 kHz. Wynika to z możliwości odbioru dźwięków o takich częstotliwościach przez mikrofony. Inaczej przedstawia się sytuacja po stronie nadawczej. Wysyłanie w powietrze sygnału akustycznego o tak szerokim paśmie częstotliwości i odpowiednio dużym natężeniu odbywa się w wyniku impulsowego pobudzenia przetworników piezoelektrycznych lub przez wyładowanie elektryczne w układzie kondensatorów.

Odrębny problem stanowi dobór własności materiałów pochłaniających. Oczywiście, nie mogą to być materiały te same co w obiekcie modelowanym ze względu na silnie nieliniową charakterystykę częstotliwościową. Problem ten odgrywa pierwszoplanowe znaczenie w ocenie dokładności uzyskiwanych rezultatów. Pomimo tych problemów, modelowanie ultradźwiękowe jest stosowane i odegrało znaczącą rolę w badaniu akustyki obiektów.

### 2.3. Modele abstrakcyjne

Model matematyczny określa relacje pomiędzy zmiennymi wejściowymi, wyjściowymi i zmiennymi stanu. W zależności od stosunku między wymiarami pomieszczenia a długością fal tworzących pole akustyczne, daje się wyodrębnić pomieszczenia o małej i dużej

wielkości falowej. W przypadku pomieszczeń falowo małych, długości fal i wymiary pomieszczeń są tego samego rzędu, tzn. różnią się między sobą co najwyżej kilkakrotnie. Cechą tych pomieszczeń jest wyraźne występowanie w nich zjawisk falowych, tj. nakładania się, rozpraszania i ugięcia fal. Poprawny opis pola akustycznego wymaga uwzględnienia w modelu zależności fazowych dla drgań cząstek ośrodka. Dla pomieszczeń falowo dużych, długości fal są znacznie mniejsze w stosunku do gabarytów pomieszczeń. Większość zjawisk falowych jest wówczas trudna do zaobserwowania co pozwala na pominięcie ich w modelu. W zależności od kształtu pomieszczenia, stopnia rozproszenia dźwięku przy jego odbiciu od powierzchni ograniczającej pomieszczenie, a także od czasu jaki upłynął od chwili wzbudzenia pola, można wyróżnić dodatkowo duży i mały stopień uporządkowania kierunków biegu fal.

Wyróżnia się zatem trzy postacie pola akustycznego w pomieszczeniu, które determinują również wybór metody modelowania. Są to postacie następujące:

- pole akustyczne w pomieszczeniu falowo dużym o uporządkowanej strukturze frontów fal,
- pole akustyczne w pomieszczeniu falowo dużym o nieuporządkowanej strukturze frontów fal,
- pole akustyczne w pomieszczeniu falowo małym,

Dla modelowania wymienionych typów pomieszczeń stosuje się odpowiednio następujące metody:

- metody geometryczne (promieniową, źródeł pozornych, metodę stożków),
- metodę statystyczną.
- metodę falową, metodę falowodu cyfrowego, metodę perturbacyjną, metodę różnic skończonych, metodę elementów skończonych i metodę elementów brzegowych.

Przedstawiona klasyfikacja dotyczy przede wszystkim zagadnień wewnętrznych pól akustycznych. Modelowanie zewnętrznych pól akustycznych wymaga odrębnego podejścia. Formalnie nie ma przeszkód, a żeby do badań zewnętrznego pola akustycznego zastosować metody geometryczne czy też metodę elementów skończonych i brzegowych.

**Modele geometryczne** Główne założenie modeli geometrycznych bazuje na prostoliniowej propagacji promienia dźwiękowego i jego odbiciu zgodnie z prawami odbicia od płaskiej powierzchni o nieskończonych wymiarach. Teoria ta zawodzi w przypadku fal o niskich częstotliwościach (gdy długość fali porównywalna jest z wymiarami powierzchni odbijającej) i dla fal o częstotliwościach wysokich (gdy długość fali jest rzędu wymiaru struktury zewnętrznych powierzchni odbijającej).

Najczęściej stosowane są dwie metody wykorzystujące modelowanie geometryczne: metoda promieniowa i metoda źródeł pozornych.

W metodzie promieniowej ciągłą fale akustyczną rozważa się jako dyskretny zbiór tzw. promieni dźwiękowych, rozprzestrzeniających się z prędkością propagacji dźwięku i niosących

jednakową część energii emitowanej przez źródło. Energia ta jest tracona w kolejnych odbiciach, proporcjonalnie do współczynnika pochłaniania dźwięku danej powierzchni ograniczającej. Pojedynczy promień nie zmniejsza swej wartości energii wraz z kwadratem odległości. Spadek energii spowodowany odległością od źródła jest uwzględniony przez zmniejszenie się wraz ze wzrostem odległości liczby promieni docierających do odbiornika. Ponieważ prawdopodobieństwo trafienia w punkt jest znikomo małe, odbiornik zastępuje się strefą. Uśrednienia w obszarze obserwacji wszystkich danych związanych z energią poszczególnych promieni dźwiękowych prowadzi do powstania odpowiedzi impulsowej wnętrza w dziedzinie czasu.

W metodzie źródeł pozornych źródła dźwięku i układ ograniczający wnętrze zastępuje się siatką pozornych źródeł dźwięku. Źródła pozorne tworzone są w ten sposób, iż każdej fali akustycznej dochodzącej do punktu obserwacji ze źródła rzeczywistego, odpowiada oddzielne źródło pozorne.

**Model statystyczny** Model ten powstał według statystycznej teorii pola akustycznego, której twórcą jest Sabine (1900). Nazwa metody bierze się stąd, iż operuje ona pojęciami średniej długości drogi swobodnej fali dźwiękowej oraz średniego czasu. Zakłada się w niej, że gęstość energii fali dźwiękowej w każdym punkcie pomieszczenia jest równa, i że prawdopodobieństwo padania fali dźwiękowej jest jednakowe we wszystkich kierunkach. Posługując się tą metodą wyprowadzono często stosowany wzór na określenie czasu pogłosu pomieszczenia:

$$T = \frac{0,161V}{S\alpha_r}$$

gdzie:

- $V$  – objętość pomieszczenia,
- $S$  – pole powierzchni pomieszczenia,
- $\alpha_r$  – średni pogłosowy współczynnik pochłaniania dźwięku.

**Model falowy** Model ten opiera się na równaniu falowym, które jest klasyczną formą opisu pola w pomieszczeniu falowo małym. Równanie falowe jest równaniem różniczkowym cząstkowym typu hiperbolicznego w postaci (2.1)[17].

$$\nabla^2\Phi - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1)$$

gdzie:  $\Phi$  jest potencjałem akustycznym,  $c$  prędkością rozchodzenia się zaburzenia.

Formalnie rzecz ujmując, do jego rozwiązania konieczne jest zdefiniowanie warunków brzegowych i początkowych. W przypadku pomieszczeń o najprostszych kształtach np. prostopadłościanu, kuli, walca o jednolitych właściwościach akustycznych ośrodka oraz szczególnych warunkach na brzegu obszaru (całkowite pochłanianie względnie całkowite odbicie), można analitycznie wyznaczyć rozwiązanie równania dla stanu ustalonego przy wymuszeniu harmonicznym. Możliwe są również do wyznaczenia częstości drgań własnych

pomieszczenia. Przy pobudzeniu pomieszczenia sygnałem stacjonarnym o stałej charakterystyce amplitudowo-częstotliwościowej można wyznaczyć mody drgań. Mody najniższych rzędów, magazynujące najwięcej energii, odpowiadają falom stojącym o długościach współmiernych z wymiarami pomieszczenia, a więc niskim częstotliwościom dźwięku. Mody wyższych rzędów, odpowiadające wyższym częstotliwościom, magazynują odpowiednio mniej energii. Prawdopodobnie ta sugeruje teoretyczny sposób wyznaczania stosowności metody falowej. Przy znanych wymiarach pomieszczenia można wyznaczyć długość fali stojącej, związanej z najwyższym znaczącym modem drgań.

**Metoda falowodu cyfrowego** W metodzie falowodu cyfrowego modelowany układ jest przybliżony falowodem opisanym równaniem różniczkowym cząstkowym, którego zmienne ciągle zastąpione zostają zmiennymi dyskretnymi [14]. Następnie układ ten przedstawiany jest w formie modelu zbudowanego z cyfrowych filtrów i układów opóźniających. Zatem działanie układu przybliżane jest modelem cyfrowego przetwarzania sygnałów.

Metoda falowodu cyfrowego najczęściej stosowana jest do analizy fizycznej instrumentów muzycznych, kanałów głosowych, a rzadziej do analizy pola akustycznego ze względu na trudności w modelowaniu komór o skomplikowanych kształtach i impedancyjnymi warunkami brzegowymi. Niewątpliwą zaletą tej metody jest możliwość wykonywania obliczeń w czasie rzeczywistym, co czyni ją szczególnie przydatną do syntezy dźwięków modelowanych instrumentów.

**Metoda perturbacyjna** Metoda perturbacyjna opiera się na opisie analizowanego problemu za pomocą zmodyfikowanego o określony mały parametr (lub zespół parametrów) znanego rozwiązania dla układu podobnego. W analizie pola akustycznego pomieszczeń o geometrii nieznacznie różniącej się od prostopadłościanu potencjał prędkości akustycznej jest przedstawiany jako ważona suma funkcji własnych pomieszczenia prostopadłościanowego o sztywnych ściankach. Waga przypisana jest do poszczególnych funkcji własnych uwzględniając zniekształcenie geometrii i impedancyjne warunki brzegowe. Metoda ta jest mało uniwersalna, pozwala na analizę tylko w zakresie niewielkich zmian w odniesieniu do znanego rozwiązania.

**Metoda różnic skończonych** Metoda ta polega na wykorzystaniu bezpośrednio równania różniczkowego, opisującego dane zagadnienie. Jej istota opiera się na zastąpieniu pochodnych cząstkowych przez różnice skończone, które wynikają bezpośrednio z dyskretyzacji analizowanego obszaru. Jej zaletą jest to, że nie wymaga całkowania numerycznego, wprost generuje układ równań algebraicznych liniowych. Za wadę można przyjąć problemy z modelowaniem skomplikowanych brzegów oraz kłopotliwe czasami nakładanie warunków brzegowych (w niektórych wypadkach wymaga dodawania wirtualnych węzłów). Metoda różnic skończonych jest szeroko wykorzystywana w mechanice płynów, jest uważana za metodę, która osiągnęła szczyt swojego rozwoju [32].

**Metoda elementów skończonych** W metodzie elementów skończonych traktuje się wnętrze obszaru jako układ połączonych węzłami elementów, któremu odpowiada układ równań różniczkowych (w zagadnieniach dynamicznych) lub algebraicznych (w zagadnieniach statycznych), opisujących przemieszczenia uogólnione węzłów. Pierwszym etapem prac jest dyskretyzacja badanej przestrzeni na elementy o prostych kształtach. W każdym elemencie utworzonej sieci opisuje się wybraną wielkość pola akustycznego przy pomocy funkcji interpolujących o nieznanach współczynnikach. Zgodnie z prawem ciągłości funkcje opisujące pole w poszczególnych elementach, a także pochodne tych funkcji, powinny w sposób ciągły łączyć się ze sobą na brzegach poszczególnych elementów. Na podstawie warunków brzegowych równania falowego, określonych przez wartości ciśnienia akustycznego oraz jego gradientu na brzegu obszaru, wyznacza się współczynniki funkcji w elementach przylegających do brzegu, a stąd – na podstawie założenia o ciągłości funkcji – w pozostałych elementach. Postępowanie numeryczne sprowadza się do wygenerowania siatki węzłów i elementów, wyznaczenia numerycznych wartości współrzędnych uogólnionych w węzłach poprzez rozwiązanie układu równań różniczkowych zwyczajnych dla stanów nieustalonych, bądź układu równań algebraicznych dla stanów ustalonych, a następnie wykorzystanie funkcji interpolujących dla obliczenia parametrów akustycznych wewnątrz elementów.[41]

**Metoda elementów brzegowych** Metoda elementów brzegowych oparta jest o dyskretyzację tylko płaszczyzn ograniczających model - powierzchni brzegu. W tym wypadku rezygnuje się z dyskretyzacji przestrzeni wewnątrz analizowanego obszaru. Równanie opisujące zagadnienie akustyczne w dziedzinie częstotliwości jest takie samo, jak w metodzie elementów skończonych.[8]

## 2.4. Podsumowanie

Jak z tego krótkiego przeglądu widać, pole akustyczne można modelować na wiele różnych sposobów. Dzięki temu posiadamy narzędzia pozwalające na badanie możliwości sterowania dźwiękiem w pewnym obszarze. W obszarach otwartych jest to łatwiejsze ze względu na brak (lub zmniejszenie skali) problemów związanych z przyjęciem wartości warunków brzegowych, które to problemy stają się niezwykle istotne w przypadku analizy pola w obszarze zamkniętym (mniej lub bardziej pogłosowe pole).

Modele fizyczne z racji trudności w stosowaniu ustąpiły miejsca metodom numerycznym.

Spośród omówionych metod modelowania w dalszej części pracy zostały wykorzystane modele geometryczne zaimplementowane w pakiecie obliczeniowym Raynoise oraz metoda elementów skończonych zaimplementowana w pakietach Sysnoise oraz CSC Elmer). Wszystkie wykorzystywane pakiety obliczeniowe zostały użyte zgodnie z licencjami producenta.

Przy pomocy metody geometrycznej zbadany zostanie wpływ kształtu charakterystyki kierunkowej na rozkład pola akustycznego. Zaś metoda elementów skończonych posłuży do badania rozkładu pola akustycznego generowanego przez wielopunktowe źródło dźwięku.

## 3. Metody kształtowania charakterystyk kierunkowych źródeł dźwięku

### 3.1. Wprowadzenie

Efekt sterowania rozkładem pola akustycznego w wybranym obszarze można osiągnąć różnymi drogami. Ponieważ pole akustyczne stanowi obszar ośrodka pobudzonego do drgań mechanicznych, to na rozkład parametrów tego pola będą miały wpływ głównie: sposób pobudzania tegoż ośrodka do drgań, warunki na brzegu wybranego obszaru oraz właściwości samego ośrodka. Oprócz sposobu pobudzenia do drgań istotne jest też geometryczne położenie w tym obszarze elementów pobudzających do drgań (źródeł dźwięku).

W niniejszym rozdziale przyjrzymy się wybranym metodom kształtowania charakterystyk kierunkowych źródeł dźwięku.

Charakterystyka kierunkowa stanowi biegunowy (sferyczny) wykres wskaźnika kierunkowości, definiowanego jako iloraz ciśnienia akustycznego  $p$  w danym kierunku i ciśnienia akustycznego  $p_g$  na osi głównej w tej samej odległości od źródła dźwięku.[16]

### 3.2. Klasyczne metody kształtowania charakterystyk kierunkowych źródeł dźwięku

Każde źródło dźwięku posiada własną charakterystykę kierunkową. Z punktu widzenia praktyki nie każda charakterystyka kierunkowa nadaje się do konkretnej aplikacji. I tak np. dla potrzeb nagłośnienia powierzchni odsłuchowej oczekujemy, aby kształt charakterystyki kierunkowej był stały w funkcji częstotliwości, by utrzymać założone proporcje częstotliwościowych składowych sygnału docierających do słuchacza. Wymagana jest odpowiednia ostrość charakterystyki kierunkowej, pozwalająca na nagłaśnianie założonej powierzchni przy wykorzystaniu minimalnej mocy źródła jednocześnie zapewniając odpowiednią równomierność nagłośnienia. Konieczne staje się też zapewnienie odpowiedniego kierunku maksimum promieniowania dźwięku. Takie rozwiązania pozwalają na:

- ograniczenia zanieczyszczenia dźwiękiem obszaru poza polem odsłuchu,
- minimalizacja zakłócającego odbiór efektu echa na skutek odbić od dalekich obiektów,
- właściwe nagłośnienie powierzchni w miastach (np. Rynek Główny w Krakowie) w trakcie trwania imprez masowych,

— realizację nagłośnienia strefowego na większych obszarach (np. Błonia dla ponad miliona osób).

W celu sprostanania tym wymaganiom podejmowane były prace nad zmianami charakterystyk kierunkowych źródeł dźwięku na drodze konstrukcyjnej. Działania te sprowadzały się do zmian w kształcie elementu promieniującego, wprowadzaniu wielu elementów promieniujących umieszczonych wzdłuż prostej, czy też w węzłach prostokątnej siatki, dodawanie różnego rodzaju osłon, rozpraszaczy i obudów, czy tub. Poniżej omówiono poszczególne metody zmian charakterystyk kierunkowych źródeł dźwięku.

**Tuby** Najstarszym ze sposobów zmian charakterystyki kierunkowej źródła dźwięku są tuby. Trudno określić moment pierwszego praktycznego zastosowania tych ustrojów. Pewne są doniesienia historyczne z XV, według niektórych autorów XIII wieku przed naszą erą – biblijne Jerycho. Tuby jako ustroje modyfikujące charakterystyki źródeł są z powodzeniem stosowane do dnia dzisiejszego.

Pod pojęciem tuby akustycznej rozumiemy rurę o zmiennym przekroju, której zadaniem jest transformacja impedancji źródła umieszczonego u wlotu tuby na impedancję wylotu tuby możliwie bliską impedancji otoczenia.

Efekt działania tuby akustycznej objawia się zdecydowanym zwiększeniem kierunkowości źródła akustycznego.

Ze względu na kształt dzielimy tuby na:

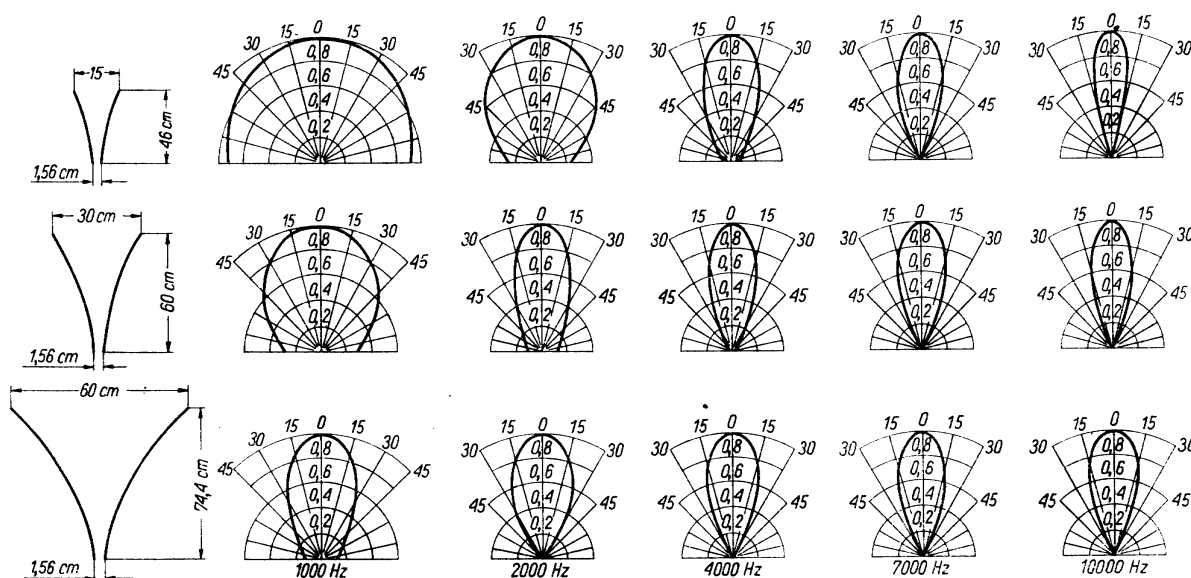
- tuby łańcuchowe,
- tuby wykładnicze,
- tuby stożkowe,
- tuby paraboliczne,
- tuby hiperboliczne.

Przy czym tuba łańcuchowa i stożkowa to graniczne przypadki tub dopuszczalnych.

Między sobą tuby te różnią się nie tylko kształtem, ale i wartością współczynnika przeniesienia, definiowanego jako iloraz mocy wypromieniowanej na wylocie tuby (mocy przeniesionej przez tubę) i mocy przenoszonej przez taką samą powierzchnię w przypadku fali płaskiej w tych samych warunkach akustycznych (ten sam ośrodek, amplituda i częstość drgań).

Charakterystyka kierunkowa tuby zależy od amplitudy i fazy drgań cząstek w płaszczyźnie wylotu tuby, a tym samym zależy od kształtu i rozmiarów tuby. Dla fal o długości większej niż średnica wylotu tuby o charakterystyce kierunkowej decyduje średnica wylotu (a dokładniej iloraz średnicy wylotu i długości fali), dla fal krótszych niż średnica wylotu decydujący jest kształt tuby [50]. Rysunki 3.1 oraz 3.2 ilustrują opisane zależności.

Używając zamiast jednej tuby zespołu tub można uzyskać zmianę charakterystyki kierunkowej takiego źródła. W takim wypadku można uzyskiwać charakterystyki np. zbliżone do dookólnych nawet dla wysokich częstotliwości. Rysunek 3.3 przedstawia tubę wielodrożną piętnastoczołową. Na rysunku zaznaczono dwie płaszczyzny: A-A oraz B-B.



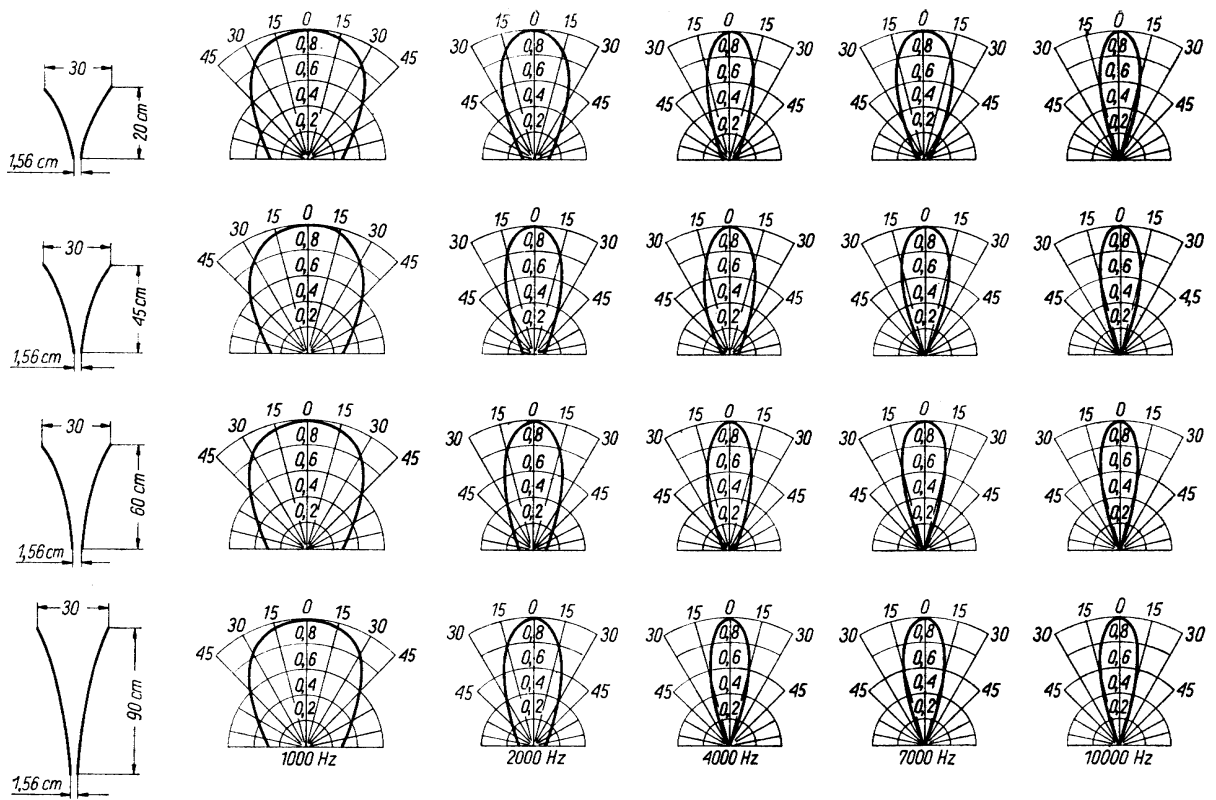
Rysunek 3.1. Charakterystyki kierunkowe tub jednakowo rozszerzających się i mających tę samą powierzchnię wlotu, lecz różne długości [50]

Rysunki 3.4 i 3.5 przedstawiają charakterystyki kierunkowe w zaznaczonych na rysunku 3.3 płaszczyznach.

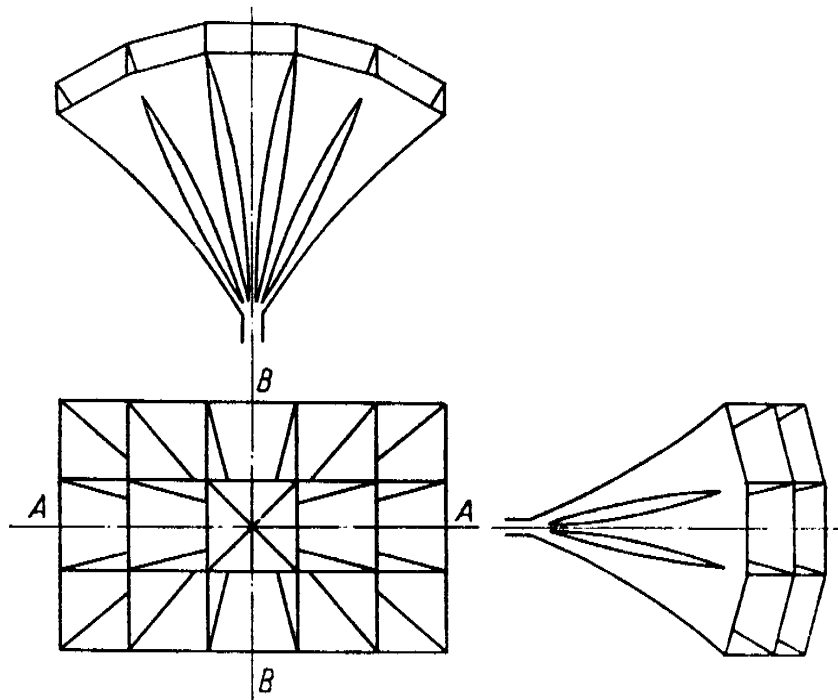
**Rozpraszacze dźwięku** Ponieważ charakterystyka kierunkowości głośnika przy dużych częstotliwościach jest niewystarczająca, stosuje się rozpraszacze dźwięku w postaci skrzydełek umieszczonych pod różnymi kątami wewnątrz stożka membrany lub w postaci krótkiego stożka ściętego przymocowanego do środkowego nabiegownika i zwróconego większą podstawą w stronę podstawy membrany[50].

Rozpraszacz odbija fale dźwiękowe wytworzone przez membranę i kieruje je pod możliwie dużym kątem do osi głośnika. Pierwszy rodzaj rozpraszacza działa jedynie w płaszczyźnie skrzydełek. Zazwyczaj wystarcza to do rozszerzenia charakterystyki kierunkowej w płaszczyźnie poziomej (dla skrzydełek umieszczonych pionowo. Czasem można spotkać dwa układy wzajemnie prostopadłych skrzydełek, gdy chodzi o korekcję charakterystyki kierunkowej w dwóch płaszczyznach (prostopadłych).

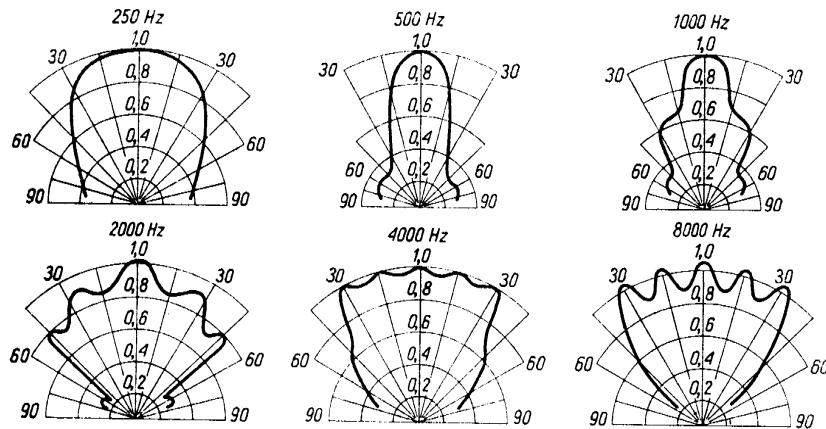
**Źródła złożone** Dotychczas omówione sposoby sterowania polem akustycznym bazowały na dopasowaniu impedancji promieniowania do impedancji ośrodka czy na odbijaniu wiązki fal, co pozwalało na uzyskanie odpowiedniej charakterystyki kierunkowej. Gdy zastosujemy źródła złożone mamy do czynienia ze zmianą wielkości źródła promieniującego dźwięk oraz zmianą geometrycznej konfiguracji promieniujących źródeł elementarnych.



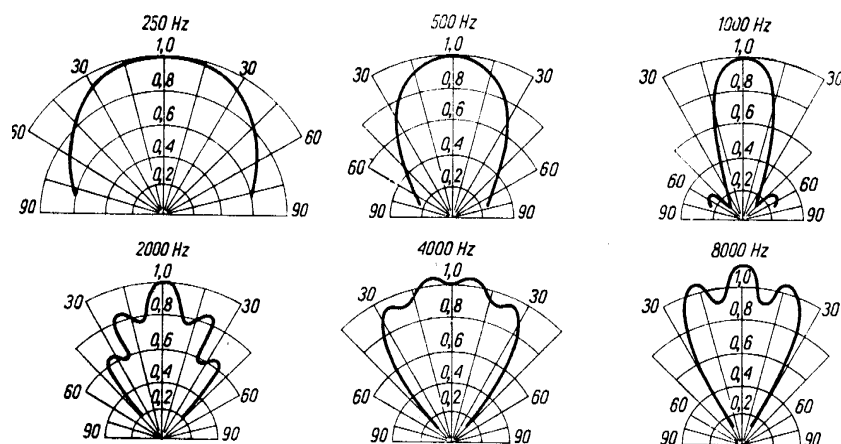
Rysunek 3.2. Charakterystyki kierunkowe tub o różnych długościach i jednakowych powierzchniach wlotów i wylotów.[50]



Rysunek 3.3. Tuba wielodrożna piętnastoczłonowa[50]



Rysunek 3.4. Charakterystyki kierunkowe tuby wielodrożnej z rysunku 3.3 w płaszczyźnie poziomej (A-A) [50]



Rysunek 3.5. Charakterystyki kierunkowe tuby wielodrożnej z rysunku 3.3 w płaszczyźnie pionowej (B-B)[50]

Jest to najstarszy i najbardziej intuicyjnie zrozumiały sposób modyfikowania rozkładu pola akustycznego generowanego przez układ źródeł. [29]

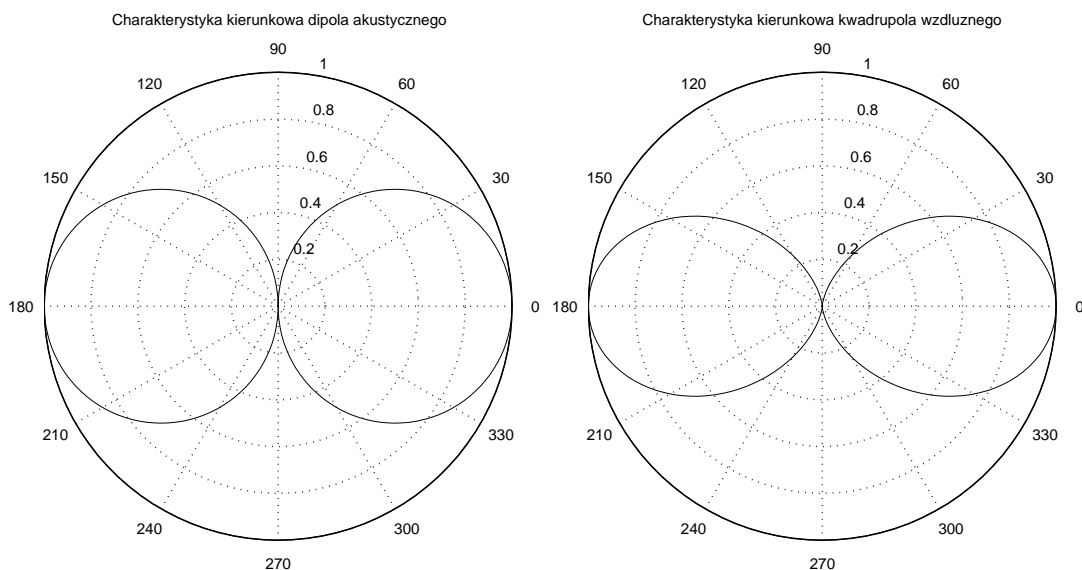
Częstotliwości, dla których można zastosować takie układy są zdeterminowane przez wymiary geometryczne źródła. Ponieważ odległość między źródłami musi być porównywalna z najkrótszą długością fali – określa górną granicę częstotliwości dla źródła wielopunktowego. Z kolei odległość między skrajnymi (w przypadku źródeł liniowych) źródłami, porównywalna z największą długością fali – określa dolną granicę częstotliwości zastosowania takiego źródła.

**Źródła złożone bez przesunięcia fazy** Bardzo wczesnie rozpoczęto prace nad kierunkowością źródeł złożonych. Na rysunku 3.6 przedstawiono charakterystykę kierunkową dipola i kwadrupola wzdłużnego jako przykłady takich prostych źródeł złożonych ze źródeł punktowych.

Oczywiście taki rozkład pola akustycznego, a tym samym takie same charakterystyki kierunkowe posiadają nie tylko układy źródeł punktowych np.: realizację dipola akustycznego (źródła rzędu pierwszego) może stanowić drgająca kula.

W trakcie badań brano pod uwagę źródła punktowe ułożone wzdłuż odcinków różnych konfiguracjach geometrycznych. Większość z tych badań stanowiła rozważania czysto teoretyczne. Z praktycznego punktu widzenia najbardziej istotne okazały się płaskie układy źródeł (jedno i dwuwymiarowe).

Najczęściej stosowanymi źródłami tego typu są kolumny głośnikowe. Z teoretycznego punktu widzenia stanowią one układ jednakowych źródeł rozmieszczonych wzdłuż prostej. Źródła składowe mają jednakowe charakterystyki kierunkowe. Ponieważ rozkład pola akustycznego w strefie Fraunhofera jest determinowany przez różnice faz wynikające z różnicy dróg fal pochodzących od poszczególnych źródeł składowych, więc charakterystyka kie-



Rysunek 3.6. Wybrane elementarne układy źródeł punktowych – dipol akustyczny i kwadrupol wzdłużny

runkowa takiego źródła złożonego jest łatwa do określenia na drodze prostych zależności geometrycznych. Wielu autorów opisało sposób obliczania charakterystyki dla różnej liczby źródeł. W praktyce takie źródła stosuje się, gdy istnieje potrzeba nagłośnienia dużej przestrzeni (najczęściej otwartej). Kształt charakterystyki kierunkowej układu złożonego z  $n$  źródeł punktowych rozmieszczonych równomiernie co  $d$  wzdłuż odcinka można obliczyć posługując się wyrażeniem 3.1 [50].

$$K(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{n\pi d}{\lambda} \sin \theta\right)}{n \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta\right)} \quad (3.1)$$

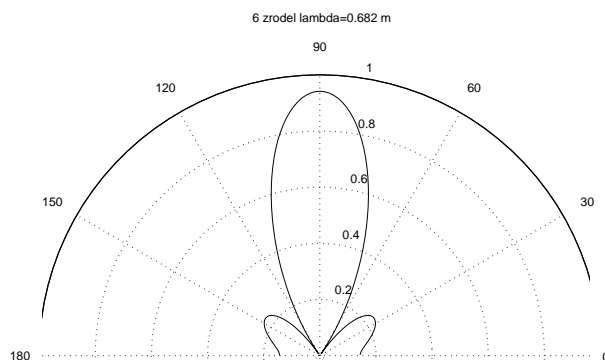
gdzie  $\theta$  jest kątem między osią główną a rozważanym kierunkiem.

Rysunek (3.7) ilustruje kształt charakterystyki kierunkowej dla układu złożonego z 6 źródeł w postaci sztywnych tłoków o jednostajnym rozkładzie drgań na powierzchni przy długości emitowanej fali wynoszącej 0,682 m. Rysunek (3.8) ten sam układ dla długości fali wynoszącej 0,34 m. W obliczeniach nie uwzględniono wpływu skończonych wymiarów obudowy.

Gdy odległości między źródłami są większe niż połowa długości fali, czyli:

$$d \geq \frac{\lambda}{2} \quad (3.2)$$

w charakterystyce kierunkowej pojawiają się szkodliwe listki boczne o znacznej amplitudzie (w literaturze znane pod nazwą *grating lobes*[46]).



Rysunek 3.7. Charakterystyka kierunkowa w płaszczyźnie prostopadłej do osi wzdłużnej kolumny złożonej z 6 źródeł w postaci sztywnych tłoków

**Źródła złożone z przesunięciem fazy** Źródła tego typu zostały opisane wiele lat temu. Malecki w 1964 roku [35], a później Żyszkowski [50] opisuje układ dwóch źródeł punktowych w odległości  $d$  od siebie z przesunięciem fazy drgań tych źródeł.

Do układu opisanego w poprzednim punkcie wprowadzamy dodatkowe przesunięcie fazowe. Przebieg zmian ciśnienia akustycznego w punkcie  $\mathbf{P}$  składa się z ciśnień pochodzących od tych źródeł z przesunięciem fazowym wynikającym z różnicy dróg od punktu  $\mathbf{P}$  do każdego ze źródeł. Oprócz przesunięcia faz wynikającego z różnicy dróg wprowadza się dodatkowe przesunięcie fazy drgań źródeł  $\Delta\Theta$ . W wyniku tego zabiegu następuje odchylenie maksimum charakterystyki kierunkowej od osi głównej i zmiana kształtu charakterystyki kierunkowej. W takim wypadku charakterystyka kierunkowa jest opisana równaniem (3.3).

$$Q(\gamma) = \frac{\sin \left[ n\pi \left( \frac{d \sin \gamma}{\lambda} + \frac{\Delta\Theta}{2\pi} \right) \right]}{n \sin \left[ \pi \left( \frac{d \sin \gamma}{\lambda} + \frac{\Delta\Theta}{2\pi} \right) \right]} = \frac{\sin \left[ n \left( \frac{kd \sin \gamma}{2} + \frac{\Delta\Theta}{2} \right) \right]}{n \sin \left( \frac{kd \sin \gamma}{2} + \frac{\Delta\Theta}{2} \right)} \quad (3.3)$$

gdzie:

$\lambda$  – długość fali,

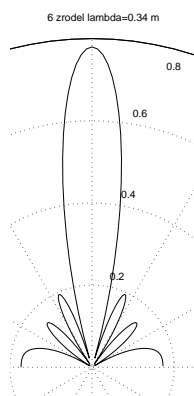
$\Delta\Theta$  – przesunięcie fazowe pomiędzy źródłami,

$\gamma$  – kąt od osi symetrii układu,

$n$  – liczba źródeł promieniujących,

$d$  – odległość pomiędzy poszczególnymi źródłami,

$k = 2\pi/\lambda$  – liczba falowa.



Rysunek 3.8. Charakterystyka kierunkowa w płaszczyźnie poziomej kolumny złożonej z 6 źródeł w postaci głośników

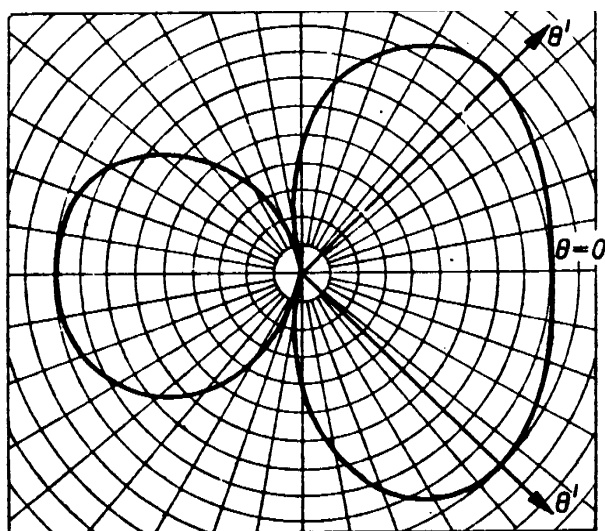
Rysunek (3.9) ukazuje efekt przesunięcia fazy drgań źródeł w stosunku do siebie przy przesunięciu  $\Delta\Theta = \pi/4$ . Źródła takie promieniują najsilniej w kierunku  $\gamma_m$ , określonym zależnością 3.4

$$\sin \gamma_m = \frac{\lambda \Delta\Theta}{2\pi d} \quad (3.4)$$

Sterowanie charakterystyką kierunkową układu dwóch źródeł punktowych nie daje dobrych efektów ponieważ nie ma zbyt dużych możliwości kształtowania tej charakterystyki. Rysunek 3.9 dobrze ilustruje napotymane trudności – w istocie możemy sterować jedynie szerokością charakterystyki kierunkowej źródła złożonego z dwóch źródeł składowych.

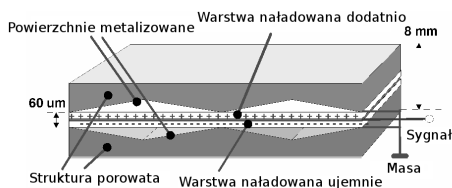
### 3.3. Współczesne metody kształtowania charakterystyki kierunkowej źródła dźwięku

Próby dotyczące sterowania dźwiękiem przy pomocy źródeł o zadanym ciągłym rozkładzie drgań na powierzchni nie są nowe. Roman Wyrzykowski [48] [49] analizując możliwość kształtowania charakterystyki kierunkowej źródła proponował stosowanie układów piezoceramicznych do interpolacji rozkładu prędkości drgań na powierzchni źródła. Rzeczywiście możliwość dowolnego kształtowania rozkładu drgań (amplitud i faz) na powierzchni źródła dałaby niezwykle silne narzędzie do sterowania rozkładem pola akustycznego. Korzystając z podobnego pomysłu Marko Antila i inni zbudowali źródło ze sterowaną charakterystyką kierunkową i przedstawili je w maju 2001 roku na kongresie Audio Engineering Society w Amsterdamie [3]. Źródło ma postać panela składającego się z 14 oddzielnie promieniujących sekcji. Każda sekcja ma kształt wąskiego (30 mm) długiego (540 mm)



Rysunek 3.9. Charakterystyka kierunkowa układu źródeł przy przesunięciu fazy drgań o  $\Delta\Theta = \Theta'$  [50]

paska i jest płaskim głośnikiem elektrostatycznym. Całe źródło ma wymiary 490 mm na 590 mm. Schemat tego źródła przedstawiono na rysunku 3.10.



Rysunek 3.10. Schemat źródła paskowego[3]

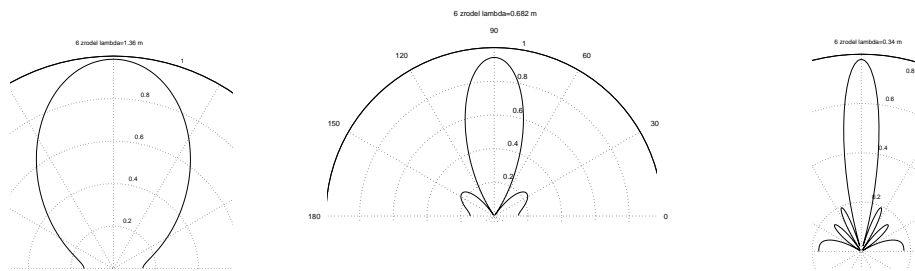
Autorzy skoncentrowali się na uzyskaniu stałej kierunkowości w szerokim paśmie częstotliwości. W swej pracy omawiają sterowanie charakterystyką kierunkową w czasie rzeczywistym i algorytmy, które opracowali i które mają służyć do uzyskania założonej charakterystyki kierunkowej. Jako cel założono uzyskanie źródła dźwięku ogólnego zastosowania ze stałą charakterystyką kierunkową. Autorzy nie zmieniają kierunku maksymalnego promieniowania, zadowolając się uzyskaniem wymaganej szerokości głównego listka charakterystyki kierunkowej. Do osiągnięcia założonego celu wykorzystano filtrację cyfrową. Zewnętrzne źródła (najbardziej odległe od osi symetrii kolumny) są wysterowane sygnałem o najmniejszym wzmocnieniu (wzmocnienie wzdłuż źródeł zmienia się podobnie jak wagi okna Hanninga). Sygnał dla każdego źródła jest modyfikowany filtrem dolnoprzestupowym. Dla źródeł leżących najdalej od osi symetrii panela częstotliwość graniczna

jest najniższa. Filtry dla źródeł leżących przy osi symetrii panela mają charakterystyki częstotliwościowe prawie płaskie.

Inne podejście zaprezentował Johan van der Werff. Jako cel postawił sobie zaprojektowanie źródła z charakterystyką kierunkową bez listków bocznych [45]. Autor w poglądowy sposób przedstawia możliwość kształtowania charakterystyki kierunkowej. Do kształtowania charakterystyki kierunkowej stosuje przysłanianie [*ang. shading*]. Dzięki odpowiedniemu doborowi zmiany wzmocnień wzdłuż źródła następuje minimalizacja listków bocznych charakterystyki kierunkowej.

### Charakterystyki kierunkowe źródła złożonego z $n$ źródeł płaskich

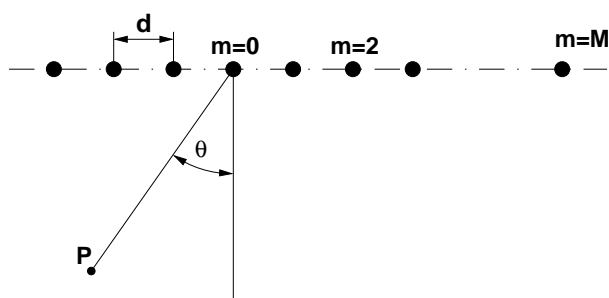
Źródło takie jest w praktyce realizowane przez kolumny dźwiękowe. Na rysunku 3.11 schematycznie przedstawiono takie źródło złożone z 6 źródeł pojedynczych wraz z przykładowymi charakterystykami, dla prostoty przyjęto, że model głośnika stanowi sztywny tłok w nieskończonej odgradzie.



Rysunek 3.11. Charakterystyki kierunkowe układu złożonego z 6 pojedynczych tłoków, przy  $d/\lambda = 0.125$

Charakterystyczne elementy charakterystyki kierunkowej, widoczne na rysunku 3.11 to: listek główny oraz listki boczne. W niskich częstotliwościach źródło zachowuje się jak źródło punktowe zaś ze wzrostem częstotliwości pojawiają się listki boczne o coraz większej amplitudzie. Jednocześnie główny listek charakterystyki kierunkowej staje się coraz węższy.

To naturalne zjawisko zazwyczaj nie jest korzystne, prowadzi bowiem do zaburzenia proporcji między poszczególnymi składowymi sygnału odbieranego poza punktami leżącymi na osi głównej. Tradycyjne rozwiązania tego problemu polegają na niewielkiej zmianie kierunku promieniowania źródeł tak by dla wyższych częstotliwości zmienić nieco kształt charakterystyki kierunkowej.



Rysunek 3.12. Schemat liniowego wielopunktowego źródła dźwięku

### Kształtowanie charakterystyki kierunkowej źródła dźwięku na drodze cyfrowego przetwarzania sygnałów

Dla liniowego źródła złożonego z  $2N + 1$  wszechkierunkowych źródeł (patrz rysunek 3.12) o różnych wzmocnieniach umieszczonych w równych odległościach od siebie wzdłuż prostej charakterystyka kierunkowości przedstawia się następującą zależnością[20]:

$$H(k, \theta) = \sum_{n=-N}^N a_n e^{-jn\omega\tau_0 \sin \theta} \quad (3.5)$$

gdzie:

$a_n$  oznacza wzmocnienia sygnałów dla poszczególnych źródeł,

$\tau_0 = d/c$  odległość elementarnych źródeł podzielona przez prędkość dźwięku.

Gdy zastosujemy podstawienie  $z = \exp(j\omega\tau_0 \sin \theta)$  zależność (3.5) stanie się równaniem opisującym liniowy filtr o skończonej odpowiedzi impulsowej (FIR). Co z kolei oznacza, iż do syntezy liniowych źródeł można wykorzystać znane techniki projektowania filtrów FIR. Gdy na przykład współczynniki wzmocnienia dla poszczególnych źródeł będą współczynnikami Czebyszewa - uzyskamy charakterystykę kierunkową z równymi poziomami listków bocznych.

Szerokość promieniowania listka głównego (pomiędzy zerami pierwszego rzędu) jest dana przez następującą zależność [20]:

$$\theta_{BW} = 2 \sin^{-1} \left( \frac{2\pi}{M\omega\tau_0} \right) \approx \frac{4\pi}{M\omega\tau_0} \quad (3.6)$$

gdzie  $M = 2N + 1$ . Analiza powyższego wyrażenia wskazuje na odwrotną proporcjonalność szerokości listka głównego charakterystyki kierunkowej i częstotliwości. Jednocześnie wyraźnie widać, iż zwiększenie ilości źródeł elementarnych czy też odległości między tymi źródłami zmniejsza szerokość listka głównego charakterystyki kierunkowej.

Jeżeli poszczególne elementarne źródła będą posiadały wzmocnienia ustawione zgodnie ze współczynnikami Czebyszewa, szerokość listka głównego jest dana następującą zależnością[20]:

$$\theta_{BW_{czeb}} = 2 \sin^{-1} \left\{ \frac{2}{\omega \tau_0} \cos^{-1} \left( \frac{1}{x_0} \cos \frac{\pi}{4N} \right) \right\} \quad (3.7)$$

gdzie  $x_0$  określa amplitudę listków bocznych charakterystyki kierunkowej[19]. Dla większych wartości  $x_0$ , odpowiadających niższym poziomom listków bocznych, szerokość listka głównego także jest większa. Podobnie jak w przypadku równania poprzedniego widoczna jest odwrotnie proporcjonalna zależność szerokości listka głównego charakterystyki kierunkowej od częstotliwości oraz zależność szerokości tego listka od ilości źródeł elementarnych i odległości między nimi.

W przypadku układów dynamicznych umożliwiających sterowanie kierunkiem maksymalnego promieniowania źródła wprowadzamy opóźnienia (przesunięcia fazy sygnału) dla poszczególnych źródeł indywidualnie dla każdego źródła. Gdy wprowadzimy opóźnienie o wartości  $n\tau$  pomiędzy każde dwa sąsiednie źródła, kierunek maksimum promieniowania odchyli się o kąt  $\phi = \arcsin(\tau/\tau_0)$  od osi głównej źródła.

Charakterystyka kierunkowa takiego źródła opisana jest następującą zależnością [20]:

$$A(\omega, \theta) = \sum_{n=-N}^N a_n e^{-jn\omega\tau_0(\sin\theta - \sin\phi)} \quad (3.8)$$

Dla źródła z jednakowymi wzmocnieniami dla wszystkich źródeł elementarnych, szerokość listka głównego wynosi:

$$\theta_{BW} = \theta_{null} - \theta_{null2} \quad (3.9)$$

gdzie wyrażenia:

$$\theta_{null} = \sin^{-1} \left( \frac{2\pi}{M\omega\tau_0} + \sin\phi \right) \quad (3.10)$$

$$\theta_{null2} = \sin^{-1} \left( \frac{-2\pi}{M\omega\tau_0} + \sin\phi \right) \quad (3.11)$$

opisują miejsca zerowe charakterystyki kierunkowej najbliższe głównego listka tejże charakterystyki.

Analiza równania 3.8 wskazuje, iż maksimum charakterystyki kierunkowej występuje wtedy, gdy:

$$\tau_0(\sin\theta - \sin\phi) = \frac{2\pi m}{\omega}$$

dla całkowitych wartości  $m$ . Dla  $m = 0$  mamy do czynienia z listkiem głównym charakterystyki, wtedy  $\theta = \phi$ , inne wartości  $m$  odpowiadają dalszym maksimum lokalnym charakterystyki, zwanym listkami bocznymi.

Ten przestrzenny „aliasing”, analogicznie do aliasingu w przestrzeni częstotliwości dla układów z czasem dyskretnym, nie występuje gdy odległości między poszczególnymi źródłami składowymi spełniają nierówność:

$$d < \frac{\lambda}{1 + |\sin \phi|} \quad (3.12)$$

Powyższa zależność stanowi analogię twierdzenia o próbkowaniu Nyquista dla próbkowania przestrzennego. Dla skrajnego przypadku sterowania charakterystyką kierunkową powyższy związek prowadzi do odległości między promiennikami mniejszej niż połowa długości fali emitowanej. Tą zależność można też wyrazić w zależności od częstotliwości w postaci:

$$f < \frac{1}{2\tau_0}$$

Dolna granica odległości między elementami wynika bezpośrednio z fizycznych rozmiarów źródeł wykorzystywanych w rzeczywistych obiektach.

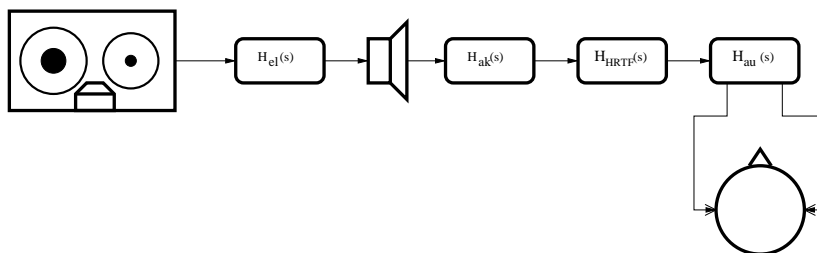
Układ jakim jest pomieszczenie wraz z promieniującymi w nim źródłami akustycznymi można opisywać na różne sposoby. Przyjmijmy opis układu elektroakustycznego przy pomocy transmitancji. Transmitancję rozumiemy jako następujący iloraz:

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad (3.13)$$

gdzie  $Y(j\omega)$  stanowi transformatę Fouriera sygnału wyjściowego, zaś  $X(j\omega)$  to transformata Fouriera sygnału wejściowego. Otrzymamy następujące transmitancje:

- transmitancja toru elektrycznego: od źródła sygnału do przetwornika elektro-mechano-akustycznego, jakim jest głośnik —  $H_{el}(s)$
- transmitancja układu akustycznego jakim jest pomieszczenie wraz z ograniczającymi je ścianami (od punktu nadawania do punktu odbioru) —  $H_{ak}(s)$
- transmitancja głowy (HRTF) —  $H_{HRTF}(s)$
- transmitancja małżowiny i kanału usznego —  $H_{aural}(s)$

Taki podział ilustruje rysunek 3.13.



Rysunek 3.13. Schemat transmitancyjny układu elektroakustycznego

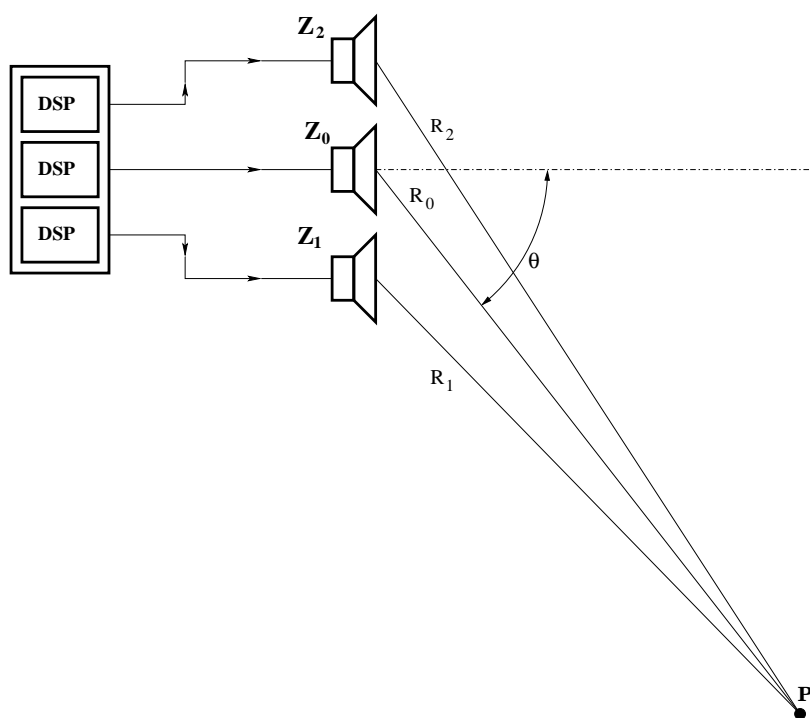
Przy zmianie charakterystyk kierunkowych źródeł dźwięku istotne stają się transmitancje związane ze źródłem dźwięku, tzn.  $H_{el}$ .

Charakterystyka kierunkowa stanowi biegunowy (sferyczny) wykres wskaźnika kierunkowości, definiowanego jako iloraz ciśnienia akustycznego  $p$  w danym kierunku i ciśnienia akustycznego  $p_g$  na osi głównej w tej samej odległości od źródła dźwięku.

Rozważając charakterystykę kierunkową zespołu źródeł (rysunek 3.14), można powiedzieć, że ciśnienie akustyczne w punkcie  $\mathbf{P}$  stanowi algebraiczną sumę ciśnień akustycznych pochodzących od poszczególnych źródeł składowych wyrażonych w postaci zespolonej (sumowanie przeprowadzamy z uwzględnieniem zależności fazowych).

Jeżeli przyjąć, że promieniowanie źródła zachodzi tak samo niezależnie od tego, czy w otoczeniu źródła znajduje się inne źródło akustyczne, to można się pokusić o wyznaczanie charakterystyk kierunkowych zespołu źródeł na drodze dokonywania splotu odpowiedzi impulsowej źródła z „elektrycznym” sygnałem sinusoidalnym.

W związku z tym zmiana transmitancji źródła ( $H_{el}$ ) pociągnie za sobą zmianę charakterystyki kierunkowej źródła (rys. 3.14).

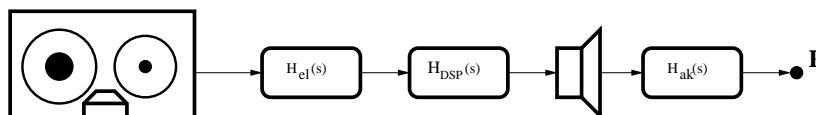


Rysunek 3.14. Schemat tworzenia charakterystyki kierunkowej układu źródeł

Kontrolowana zmiana transmitancji źródła może zachodzić na drodze cyfrowego przetwarzania sygnałów, gdy w drogę transmisji sygnału wstawimy filtry cyfrowe o zadanych

transmitancjach. Rysunek 3.15 przedstawia te elementy toru elektroakustycznego, które są istotne z punktu widzenia zmian charakterystyk kierunkowych.

Aby sterować charakterystyką kierunkową układu źródeł, należy dla każdego źródła zrealizować układ z rysunku 3.15. Najbardziej istotnym elementem tego układu jest blok oznaczony symbolem  $H_{DSP}$ , który realizuje zmianę wypadkowej transmitancji układu. Pod pojęciem DSP rozumiemy angielski termin Digital Signal Processing, czyli cyfrowe przetwarzanie sygnałów jako metodę realizacji szeroko pojętego przetwarzania sygnałów.



Rysunek 3.15. Schemat transmitancyjny układu elektroakustycznego z modyfikacją

Zgodnie z tym co do tej pory powiedziano otrzymujemy transmitancję całkowitą dla jednego źródła:

$$H_c(j\omega) = H_{el}(j\omega) \cdot H_{DSP}(j\omega) \cdot H_{ak}(j\omega)$$

Odpowiedź impulsowa  $h_c(t)$  jest odwrotną transformatą Fouriera transmitancji widmowej  $H_c(j\omega)$ ,

$$h_c(t) = \mathcal{F}^{-1}H_c(j\omega) \quad (3.14)$$

Aby określić charakterystykę kierunkową źródła trzeba znać ciśnienia akustyczne na półokręgu o środku w środku źródła i promieniu  $r$ . Ciśnienie akustyczne w punkcie  $\mathbf{P}$  możemy określić jako splot odpowiedzi impulsowej układu i sygnału wejściowego (sinusoidalnego) następująco:

$$p(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h_c(\tau) \cdot \sin(t - \tau) d\tau \quad (3.15)$$

Dla każdego z pojedynczych źródeł składowych możemy napisać podobne równanie i w wyniku otrzymamy ciśnienie akustyczne w punkcie odbioru:

$$p(\mathbf{P}, t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + \dots + p_N(t) = \sum_{i=1}^N p_i(t) \quad (3.16)$$

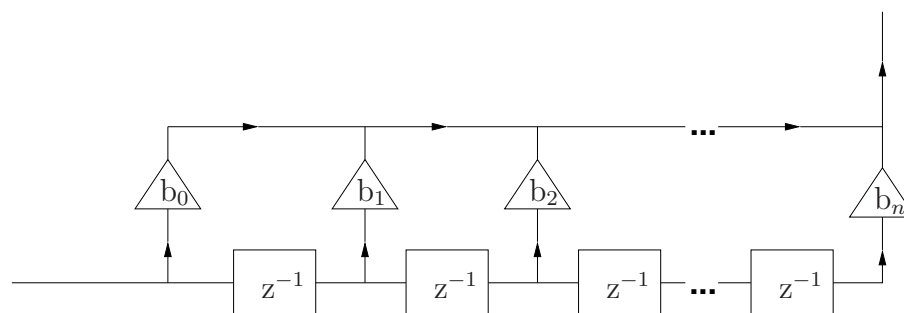
Tak proste rozwiązanie komplikuje fakt, że trzeba uwzględnić różnicę dróg między punktem  $\mathbf{P}$  i źródłami składowymi przy zmianie kąta między osią główną i promieniem wodzącym punktu  $\mathbf{P}$ . Mamy tu do czynienia z sytuacją podobną do problemów rozwiązyanych przez przybliżenie Fraunhofera. Na różnice między czasami dotarcia nakładają się

różnice kąta, jaki tworzy wektor łączący punkt  $\mathbf{P}$  i każde ze źródeł. Dodatkowa transmittancja wprowadzana w tor transmisyjny każdego źródła przez układ DSP zależy od tego właśnie kąta.

## Filtry cyfrowe

Sterowanie rozkładem pola akustycznego generowanego przez wielopunktowe źródła dźwięku sprowadza się do modyfikowania sygnałów zasilających poszczególne źródła elementarne wielopunktowego źródła dźwięku. Taka modyfikacja jest realizowana przez filtry[31]. Biorąc pod uwagę łatwość realizacji, elastyczność oraz możliwość dynamicznej modyfikacji parametrów filtra do realizacji wybrano filtry cyfrowe.

Patrząc z historycznego punktu widzenia, początkowo stosowano tylko filtry realizowane w technice analogowej. Od kilkudziesięciu lat, na skutek postępu technologii, cyfrowe przetwarzanie sygnałów stało się głównym sposobem zmiany parametrów sygnałów. Trudno sobie wyobrazić sterowanie dźwiękiem bez filtracji. Ponieważ filtry cyfrowe są o wiele bardziej uniwersalne niż ich pierwowzory analogowe, to właśnie one znajdują najszersze zastosowanie w przetwarzaniu sygnałów akustycznych.



Rysunek 3.16. Schemat filtra o skończonej odpowiedzi impulsowej (FIR)

Filtrem cyfrowym nazywany dyskretny układ liniowy niezmienny względem przesunięcia (czasu), zrealizowany za pomocą arytmetyki o skończonej precyzji. Pod pojęciem układu liniowego rozumiemy układ spełniający zasadę superpozycji.

W praktyce można napotkać różne realizacje filtrów cyfrowych. Czy to w postaci oprogramowania, czy w postaci specjalizowanych układów. Zatem pojęcie filtr cyfrowy odnosi się do programu jak i do układu fizycznego. Matematycznym modelem filtra jest równanie różnicowe o postaci:

$$y(n) = \sum_{k=0}^L a_k y(n-k) + \sum_{k=0}^M b_k u(n-k) \quad (3.17)$$

gdzie:

$$n = 1, 2, \dots, N$$

$L, M$  – nieujemne liczby całkowite  
 $y(n)$  – sygnał dyskretny wyjściowy  
 $u(n)$  – sygnał dyskretny wejściowy  
 $a_k, b_k$  - współczynniki filtra

Po dokonaniu transformacji przekształceniem  $Z$  powyższe równanie można zapisać w postaci transmitancji

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{1 - \sum_{k=0}^L a_k z^{-k}} = \frac{Y(z)}{U(z)} \quad (3.18)$$

Równanie różnicowe (3.17) można interpretować jako algorytm obliczeniowy, w którym opóźnione wyrazy pobudzenia mnoży się przez współczynniki  $b_k$ , a opóźnione wyrazy odpowiedzi przez współczynniki  $a_k$ , po czym dodaje się te wszystkie iloczyny. Czyli filtr cyfrowy można zrealizować przy użyciu członów wykonujących operacje:

- opóźnienia
- mnożenia
- sumowania

Rysunek 3.16 przedstawia schemat filtra cyfrowego o skończonej odpowiedzi impulsowej. Na rysunku są widoczne bloki mnożenia ( $b_i$ ), sumowania, oraz opóźnienia ( $z^{-1}$ ).

Ze względu na sposób realizacji algorytmu obliczeniowego możemy filtry podzielić na dwie grupy:

- filtry rekursywne
- filtry nierekursywne

Ze względu zaś na długość odpowiedzi impulsowej filtry cyfrowe dzielimy na dwie grupy:

- filtry o nieskończonej odpowiedzi impulsowej (NOI, IIR)
- filtry o skończonej odpowiedzi impulsowej (SOI, FIR)

Filtr rekursywny jest filtrem, w którym próbki sygnałów wyjściowych  $y(n)$  są jednoznacznie zdeterminowane jako ważona suma poprzednich i bieżących próbek sygnału wejściowego i wyjściowego.

Filtr nierekursywny, to filtr, w którym wartość wyjściowa zależy jedynie od poprzednich i aktualnych próbek sygnału wejściowego.

Odpowiedź impulsowa filtrów o skończonej odpowiedzi impulsowej wynosi zero na zewnątrz pewnego ograniczonego zakresu.

Filtry o nieskończonej odpowiedzi impulsowej są zazwyczaj realizowane jako filtry rekursywne, zaś filtry o skończonej odpowiedzi impulsowej są realizowane jako nierekursywne, chociaż nie jest to jedyny sposób ich realizacji.

W praktyce, ze względu na ograniczoną dokładność obliczeń, odpowiedź impulsowa filtrów o nieskończonej odpowiedzi impulsowej jest skończona, choć bardzo długa.

### **3.4. Podsumowanie**

Rozważania zawarte w niniejszym rozdziale dają podstawy do wyprowadzenia zależności umożliwiających sterowanie charakterystykami kierunkowymi wielopunktowych źródeł dźwięku, a tym samym sterowaniem rozkładem pola akustycznego w danym obszarze.

## 4. Algorytmy sterowania kierunkowością wielopunktowych źródeł dźwięku

### 4.1. Wprowadzenie

W niniejszym rozdziale zostaną wyprowadzone zależności pozwalające na wyznaczanie charakterystyk kierunkowych źródeł wielopunktowych. Wykorzystane zostaną do określenia zależności umożliwiających sterowanie nimi, a tym samym na sterowanie polem akustycznym generowanym przez te źródła.

### 4.2. Model liniowego źródła rozciągniętego

Najogólniejszym modelem wielopunktowego źródła dźwięku stanowi źródło liniowe, w postaci prostoliniowego odcinka złożonego z nieskończonej liczby elementarnych źródeł punktowych, umieszczonych obok siebie. Zanim przejdziemy do układu złożonego z dyskretnych źródeł, dokonajmy analizy takiego układu ciągłego. Układ dyskretny będzie stanowił aproksymację układu ciągłego.

Źródło liniowe pozwala na sterowanie charakterystyką kierunkową w płaszczyźnie źródła. Jako wielkości wejściowe możemy wykorzystać amplitudy oraz fazy drgań poszczególnych źródeł elementarnych.

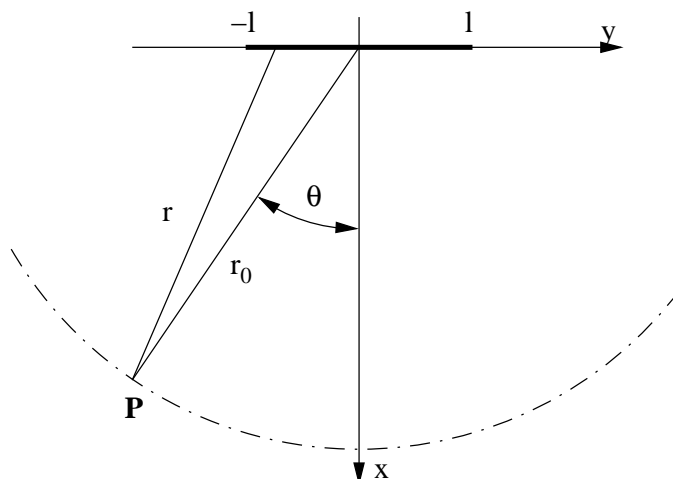
Rozpatrzmy zatem **źródło o ciągłym rozkładzie amplitud i faz drgań** wzdłuż swej długości.

Rozpatrujemy źródło w postaci odcinka wzdłuż osi  $y$  o środku w początku układu współrzędnych. Każdy punkt odcinka jest traktowany jak źródło punktowe. Wzdłuż długości odcinka rozkład amplitud i faz drgań źródeł elementarnych dany jest funkcją  $\varrho(y, \omega)$  o wartościach zespolonych.

Na podstawie wzoru całkowego Kirchhoffa [47] wiemy, że przy ustalonej pulsacji źródeł  $\omega$  potencjał akustyczny sygnału otrzymanego w punkcie  $\mathbf{P}$  dla takiego źródła wynosi:

$$\Phi(\theta, r, t) = \int_{-l}^l \varrho(y) \frac{1}{-ikr} e^{i(\omega t - kr)} dy \quad (4.1)$$

Dla zadanego kąta  $\theta$  odległość  $\bar{r}$  w zależności od  $y$  wynosi:  $\bar{r} = \bar{r}_0 - \bar{y}$  co daje:



Rysunek 4.1. Schemat geometrii źródła liniowego

$$r(y) = \sqrt{r_0^2 + y^2 - 2r_0y \sin \theta} \quad (4.2)$$

Ponieważ charakterystyki kierunkowe wyznaczamy w polu dalekim – strefie Fraunhofer, możemy pozwolić sobie na wprowadzenie pewnych uproszczeń do tej zależności.

- odległość  $r$  w mianowniku ułamka (4.1) można przybliżyć odległością punktu  $\mathbb{P}$  od środka źródła, czyli:  $r \approx r_0$
- odległość  $r$  w wykładniku  $e$  można przybliżyć jej rozwinięciem w szereg Maclaurina i będzie on zbieżny.

Rozwinięcie zależności (4.2) w szereg Maclaurina wygląda następująco:

$$r(y) \approx r(0) + \frac{y}{1!}r'(0) + \frac{y^2}{2!}r''(0) \dots \quad (4.3)$$

gdzie pierwsza pochodna wynosi

$$r'(y) = \frac{y - r_0 \sin \theta}{\sqrt{r_0^2 + y^2 - 2r_0y \sin \theta}} \quad (4.4)$$

Ograniczając się do dwóch pierwszych wyrazów rozwinięcia w szereg Maclaurina otrzymamy wynik:

$$r \approx r_0 - y \sin \theta \quad (4.5)$$

Po skorzystaniu z przedstawionego powyżej rozwinięcia w szereg Maclaurina (4.5) oraz wyłączeniu stałych składników przed znak całki, otrzymamy zależność (4.6).

$$\Phi(\theta, r, t) = \int_{-l}^l \varrho(y) \frac{1}{-ikr_0} e^{i(\omega t - k(r_0 - \sin \theta)y)} dy = \frac{-1}{ikr_0} \cdot e^{i(\omega t - kr_0)} \int_{-l}^l \varrho(y) e^{iky \sin \theta} dy \quad (4.6)$$

Ta wyprowadzona, ogólna zależność opisuje potencjał akustyczny źródła liniowego z zadanyam rozkładem amplitudy i fazy wzdłuż długości tegoż źródła. Dla weryfikacji poprawności zależności (4.6) sprawdzimy wyniki dla dobrze znanego przypadku wszystkich źródeł drgających współfazowo ze stałą amplitudą.

Dla weryfikacji rozważmy teraz **rozkład jednostajny** fazy i amplitudy drgań wzdłuż źródła.

Przyjmujemy, że rozkład fazy drgań wzdłuż źródła jest stały (nie ma przesunięć fazowych w drganiach między poszczególnymi źródłami), czyli:

$$\varrho(y) = A_0$$

Sprawdzamy czy otrzymamy znany z literatury np. [35][47][50] wzór na charakterystykę kierunkowości takiego źródła:

$$K(\theta) = \frac{\sin(kl \sin \theta)}{kl \sin \theta} \quad (4.7)$$

Obliczamy wartość potencjału akustycznego w punkcie **P** (patrz rysunek 4.1):

$$\begin{aligned} \Phi(\theta, r, t) &= \frac{-1}{ikr_0} \cdot e^{i(\omega t - kr_0)} \int_{-l}^l A_0 e^{iky \sin \theta} dy = \frac{-A_0}{ikr_0} \cdot e^{i(\omega t - kr_0)} \left[ \frac{1}{ik \sin \theta} e^{iky \sin \theta} \right]_{-l}^l = \\ &= \frac{-A_0}{ikr_0} \cdot e^{i(\omega t - kr_0)} \frac{1}{ik \sin \theta} \underbrace{\left( e^{ikl \sin \theta} - e^{-ikl \sin \theta} \right)}_{2 \sinh(ikl \sin \theta) = -2i \sin(-kl \sin \theta)} = \\ &= -i \frac{2A_0}{k^2 r_0 \sin \theta} \sin(kl \sin \theta) e^{i(\omega t - kr_0)} \quad (4.8) \end{aligned}$$

Cisnienie akustyczne możemy obliczyć ze znanej zależności:

$$p = \rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (4.9)$$

gdzie  $\rho_0$  jest gęstością ośrodka niezaburzonego

$$\bar{p} = \frac{2A_0 \rho_0 \omega}{k^2 r_0 \sin \theta} \sin(kl \sin \theta) e^{i(\omega t - kr_0)} \quad (4.10)$$

Wartość ciśnienia będzie wynosić:

$$p = \frac{2A_0 \rho_0 \omega}{k^2 r_0 \sin \theta} \sin(kl \sin \theta) \sin(\omega t - kr_0) \quad (4.11)$$

Ciśnienie akustyczne na osi głównej, po przejściu granicznym ( $\theta \rightarrow 0$ ), wynosi:

$$p_0 = \frac{2A\rho_0\omega kl}{k^2 r_0} \sin(\omega t - kr_0) \quad (4.12)$$

Zatem charakterystyka kierunkowości źródła w postaci odcinka złożonego z nieskończonej ilości źródeł punktowych wyraża się wzorem:

$$K(\theta) = \frac{p}{p_0} = \frac{\sin(kl \sin \theta)}{kl \sin \theta} \quad (4.13)$$

Otrzymany wynik jest zgodny ze źródłami literaturowymi (równanie 4.7), zatem zależność 4.6 możemy uznać za prawidłową. Zostanie ona wykorzystana do analizy kolejnych szczególnych przypadków.

### 4.3. Rozciągnięte źródło liniowe z liniowym rozkładem fazy drgań

Aby zrealizować sterowanie charakterystyką kierunkową źródła, a tym samym sterowanie rozkładem pola akustycznego musimy mieć możliwość zmieniania kształtu charakterystyki kierunkowej.

Rozważmy zatem problem: *jaką zmianę charakterystyki kierunkowej źródła uzyskamy przy zmianie rozkładu faz drgań poszczególnych źródeł.*

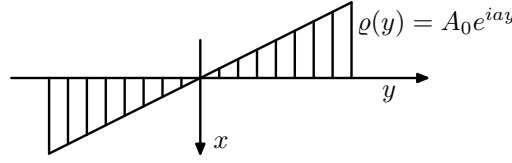
Poddamy analizie rozkład liniowy fazy drgań źródeł elementarnych wzdłuż długości źródła złożonego przy stałej amplitudzie drgań poszczególnych źródeł. Oznacza to, iż źródła po jednej stronie osi symetrii źródła nadają sygnał wcześniej, a źródła po przeciwnej stronie osi symetrii później. Jednocześnie wielkość opóźnienia (przyspieszenia) jest liniowo zależna od odległości od osi symetrii źródła.

Wprowadzenie zmiany fazy sygnałów transmitowanych przez poszczególne źródła wzdłuż długości rozpatrywanego źródła liniowego powinno skutkować pozorną zmianą długości dróg pokonywanych przez fale dochodzące od poszczególnych źródeł do punktu pomiarowego. To z kolei będzie dawać efekt podobny do obrócenia całego źródła wokół jego środka o pewien kąt. Taki efekt pozwoli na sterowanie kierunkiem maksimum promieniowania źródła liniowego.

Zatem rozpatrujemy liniowy rozkład fazy wzdłuż odcinka stanowiącego analizowane źródło liniowe (rysunek 4.2). Funkcja  $\varrho(y)$  przyjmuje postać:

$$\varrho(y) = A_0 e^{iay}, \quad \text{gdzie } a = \frac{\phi_{max}}{l} \quad (4.14)$$

Wielkość  $\phi_{max}$  oznacza maksymalną wartość przesunięcia fazy na końcu źródła w stosunku do środka tegoż źródła, zaś wielkość  $A_0$  to stała amplituda drgań źródeł elementarnych wzdłuż długości promieniującego odcinka. Jak widać na rysunku (4.2) połowa



Rysunek 4.2. Liniowy rozkład zmiany fazy źródeł wzdłuż odcinka

źródło „wyprzedza” źródło leżące pośrodku długości rozpatrywanego odcinka, połowa jest opóźniona w stosunku do tegoż źródła.

Zgodnie z zależnością (4.6) potencjał akustyczny w punkcie  $\mathbf{P}$  wynosi:

$$\begin{aligned} \Phi(\theta, r, t) &= \frac{-A_0}{ikr_0} e^{i(\omega t - kr_0)} \int_{-l}^l e^{iay} e^{iky \sin \theta} dy = \frac{-A_0}{ikr_0} e^{i(\omega t - kr_0)} \int_{-l}^l e^{iay +iky \sin \theta} dy = \\ &= \frac{-A_0}{ikr_0} e^{i(\omega t - kr_0)} \left[ \frac{e^{iy(a+k \sin \theta)}}{i(a+k \sin \theta)} \right]_{-l}^l = \frac{A_0 e^{i(\omega t - kr_0)}}{kr_0(a+k \sin \theta)} \left( e^{il(a+k \sin \theta)} - e^{-il(a+k \sin \theta)} \right) = \\ &= \frac{A_0 e^{i(\omega t - kr_0)}}{kr_0(a+k \sin \theta)} 2 \sinh[il(a+k \sin \theta)] = \frac{-2iA_0 e^{i(\omega t - kr_0)}}{kr_0(a+k \sin \theta)} \sin(la + lk \sin \theta) \quad (4.15) \end{aligned}$$

Na podstawie równania (4.9) ciśnienie akustyczne w analizowanym punkcie wyraża się zależnością:

$$\bar{p} = \frac{2A_0 \rho_0 \omega e^{i(\omega t - kr_0)} \sin(la + lk \sin \theta)}{kr_0(a+k \sin \theta)} \quad (4.16)$$

Zatem charakterystyka kierunkowości opisana jest wzorem:

$$K(\theta) = \frac{p(\theta)}{p(\theta=0)} = \frac{a \sin(la + lk \sin \theta)}{\sin(la)(a+k \sin \theta)} \quad (4.17)$$

aby znaleźć maksimum tejże charakterystyki kierunkowej wyznaczamy jej pochodną

$$\frac{dK(\theta)}{d\theta} = \frac{a \cos(la + lk \sin(\theta)) lk \cos(\theta)}{\sin(la)(a+k \sin(\theta))} - \frac{a \sin(la + lk \sin(\theta)) k \cos(\theta)}{\sin(la)(a+k \sin(\theta))^2} \quad (4.18)$$

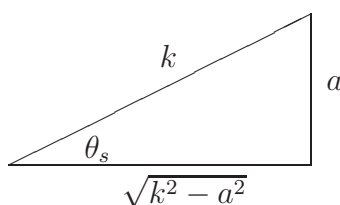
a następnie znajdujemy jej miejsca zerowe. Po dokonaniu niezbędnych przekształceń otrzymamy następujący wynik:

$$\theta = \begin{bmatrix} -1/2 \pi \\ 1/2 \pi \\ \arctan\left(\frac{-a}{\sqrt{k^2 - a^2}}\right) \\ \arctan\left(\frac{a}{\sqrt{k^2 - a^2}}\right) \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Ponieważ pierwsze dwa rozwiązania oznaczają, iż źródło liniowe nie może promieniować wzdłuż swej długości, więc naszych zastosowaniach najbardziej interesujący jest trzeci i czwarty z pierwiastków. Wykorzystując trzeci pierwiastek możemy wyznaczyć wymaganą wielkość maksymalnego przesunięcia fazowego na końcu źródła by maksimum promieniowania źródła wypadło w wymaganym kierunku. Kierunek maksymalnego promieniowania nazwiemy kątem sterowania  $\theta_s$ .

$$\theta_s = \arctan \left( -\frac{a}{\sqrt{k^2 - a^2}} \right) \quad (4.20)$$

Biorąc pod uwagę zależności geometryczne występujące w trójkącie prostokątnym, łatwo można przekształcić tą zależność do postaci (4.21).



Rysunek 4.3. Analizowany trójkąt

$$\theta_s = \arcsin \left( -\frac{a}{k} \right) = \arcsin \left( -\frac{\phi_{max}}{kl} \right) \quad (4.21)$$

Analiza z zależności (4.21) wskazuje, że kąt maksymalnego promieniowania dla liniowego źródła z liniową zmiennością przesunięć fazowych źródeł elementarnych wzdłuż długości źródła zależy od liczby falowej (a tym samym częstotliwości) i względnej wartości maksymalnego kąta przesunięcia fazowego.

**Zależność 4.21 pozwala na sterowanie rozkładem pola akustycznego generowanego przez źródło dźwięku na drodze zmiany kierunku maksimum promieniowania źródła.**

Rysunek (4.4) przedstawia wyniki dla różnych wartości kąta  $\phi_{max}$ . Długość źródła wynosi  $2l = 4$  m, analizowana częstotliwość  $f = 500$  Hz. Charakterystyki kierunkowe przedstawiono w układzie prostokątnym, na osi poziomej wartości kątów, na osi pionowej wartości charakterystyki kierunkowej.

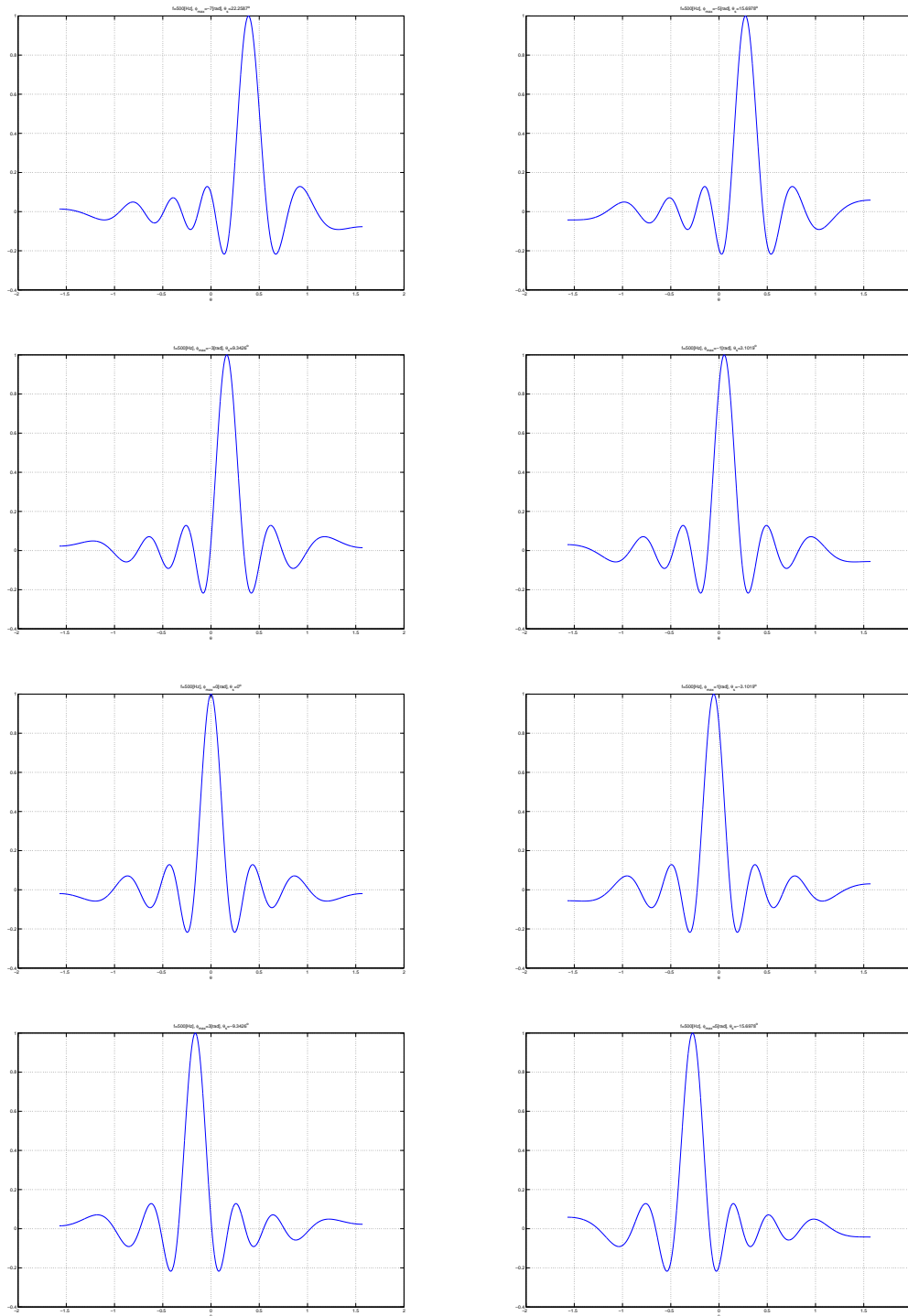
Kąt sterowania jest kątem dla którego charakterystyka kierunkowa osiąga wartość maksymalną. W zależności od maksymalnego przesunięcia fazowego na końcu źródła uzyskujemy różne kąty sterowania – zgodnie z zależnością (4.21). Uzyskane kąty sterowania zestawiono w tabeli 4.1.

| L.p. | Kąt $\phi_{max}$ [rad] | Kąt sterowania $\theta_s$ [°] |
|------|------------------------|-------------------------------|
| 1    | -7                     | 22,2587                       |
| 2    | -5                     | 15,6978                       |
| 3    | -3                     | 9,3426                        |
| 4    | -1                     | 3,1019                        |
| 5    | 0                      | 0                             |
| 6    | 1                      | -3,1019                       |
| 7    | 3                      | -9,3426                       |
| 8    | 5                      | -15,6978                      |
| 9    | 7                      | -22,2587                      |
| 10   | 17                     | -66,9137                      |

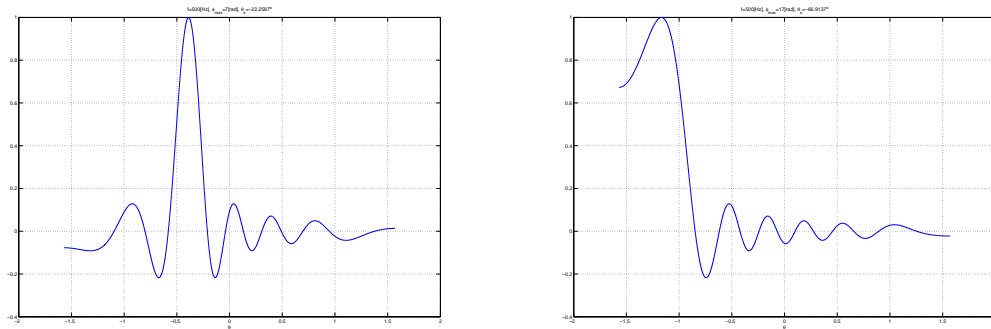
Tabela 4.1. Wartości kąta sterowania w zależności od kąta  $\phi_{max}$

Otrzymano zmiany kierunku maksymalnego promieniowania źródła liniowego. Widzimy iż analizowany układ pozwala na bardzo szeroki zakres sterowania. Wyraźne zniekształcenia występują dopiero przy kącie ok.  $60^\circ$ , co wynika z ostatniego z wykresów na rysunku 4.4 i 4.5. Dla mniejszych kątów uzyskano przesunięcie kątowe charakterystyki kierunkowej bez większych zniekształceń.

Wyniki te jednoznacznie wskazują na możliwość sterowania charakterystyką kierunkową, a tym samym na sterowanie rozkładem pola akustycznego generowanego przez źródła liniowe.



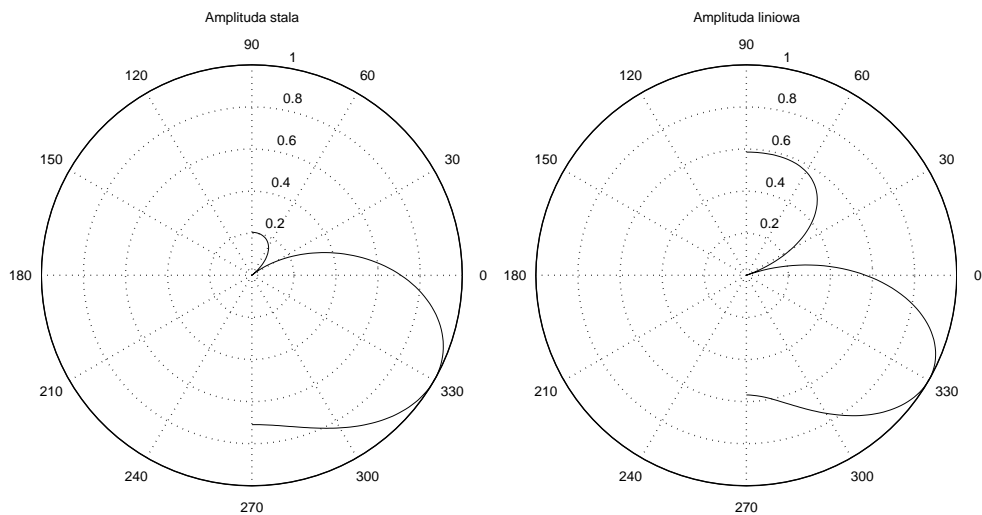
Rysunek 4.4. Charakterystyki kierunkowe (we współrzędnych prostokątnych) źródła z liniowym rozkładem fazy drgań dla maksymalnego kąta przesunięcia fazy drgań źródeł równego  $-7, -5, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 5$  [rad]. Częstotliwość 500 Hz



Rysunek 4.5. Charakterystyki kierunkowe (we współrzędnych prostokątnych) źródła z liniowym rozkładem fazy drgań dla maksymalnego kąta przesunięcia fazy drgań źródeł równego 7 i 17 [rad].  
Częstotliwość 500 Hz

Zmiana kierunku maksimum charakterystyki kierunkowej źródła występuje tylko gdy funkcja opisująca rozkład zmian przesunięć fazowych wzdłuż długości źródła nie jest symetryczna względem osi  $x$ . Rozkłady przesunięć fazowych o symetrii osiowej powodują zmianę ostrości charakterystyki kierunkowej oraz zmianę amplitud listków bocznych.

Zmiany kierunku promieniowania zależą tylko od rozkładu przesunięć fazowych drgań poszczególnych źródeł elementarnych względem siebie. Rozkłady amplitud nie wpływają na kierunek maksimum charakterystyki kierunkowej.



Rysunek 4.6. Porównanie charakterystyk kierunkowych źródła liniowego przy identycznym rozkładzie zmian fazy drgań i różnych rozkładach amplitud

Aby zilustrować to stwierdzenie zamieszczono rysunek 4.6. Przedstawiono na nim porównanie charakterystyk kierunkowych dla źródeł liniowych z liniową fazą zmienną w ten sam sposób (taka sama wartość współczynnika  $a$  z rysunku 4.2) dla tej samej częstotliwości  $f$ , ale przy różnych kształtach rozkładu amplitud. W obydwu przypadkach kierunek maksimum promieniowania (kąt sterowania) wynosił  $-30^\circ$ . W pierwszym przypadku mamy do czynienia ze stałą amplitudą wzdłuż długości źródła. W drugim przypadku amplituda zmienia się liniowo wzdłuż źródła, czyli funkcja  $\rho(y)$  opisująca wymuszenie wzdłuż źródła ma postać:

$$\rho(y) = bye^{ia y}, \text{ gdzie } b = \frac{A_{max}}{l}, a = \frac{\phi_{max}}{l} \quad (4.22)$$

Wykorzystując przedstawiony powyżej tok rozumowania wyznaczono zależności opisujące charakterystykę kierunkową źródła dźwięku z liniową zmianą fazy i amplitudy.

Wyznaczone równanie charakterystyki kierunkowej ma następującą postać:

$$K(\theta) = \frac{a^2 (l(a + k \sin \theta) \cos[l(a + k \sin \theta)] - \sin[l(a + k \sin \theta)])}{(a + k \sin \theta)^2 [la \cos(la) - \sin(la)]} \quad (4.23)$$

Porównanie obu rysunków pozwala zauważyć, że zmiana rozkładu amplitud wzdłuż długości źródła nie wpływa na kierunek maksymalnego promieniowania. Ma natomiast wpływ na ostrość charakterystyki kierunkowej.

Poniżej zostanie przedstawione wyznaczenie charakterystyki kierunkowej źródła liniowego ze stałym rozkładem fazy i rozkładem amplitud zgodnym z kwadratem funkcji cosinus. Funkcja opisująca ten rozkład ma postać:

$$\rho(y) = \cos^2\left(\frac{\pi}{2l}y\right) \quad (4.24)$$

Aby określić potencjał akustyczny należy obliczyć następującą całkę:

$$\int_{-l}^l \cos^2\left(\frac{\pi y}{2l}\right) e^{iky \sin \theta} dy = \frac{i\pi^2 (e^{ilk \sin \theta} - e^{-ilk \sin \theta})}{2 (k^2 (\sin \theta)^2 l^2 - \pi^2) k \sin \theta} \quad (4.25)$$

Zatem potencjał akustyczny wokół źródła przedstawia następująca zależność:

$$\Phi(\theta, r_0, t) = -\frac{A_0 e^{i(\omega t - kr_0)} \pi^2 (e^{ilk \sin \theta} - e^{-ilk \sin \theta})}{2k^2 r_0 (k^2 \sin^2 \theta l^2 - \pi^2) \sin \theta} \quad (4.26)$$

Po obliczeniu ciśnienia akustycznego, podzieleniu przez wartość ciśnienia akustycznego na osi głównej otrzymujemy zależność na charakterystykę kierunkową:

$$K(\theta) = \frac{\pi^2 \sin(kl \sin \theta)}{kl \sin \theta (k^2 l^2 \sin^2 \theta - \pi^2)} \quad (4.27)$$

Aby określić szerokość listka głównego i bocznych obliczamy miejsca zerowe funkcji opisującej charakterystykę kierunkową.

$$\theta = \arcsin\left(\frac{L\pi}{kl}\right), \quad (4.28)$$

Parametr  $L$  jest liczbą całkowitą. Dla  $L = 1$  zależność (4.27) nie jest określona ( $\sin \theta = \pi/(kl)$ ). Dla takiej wartości kąta  $\theta$  obliczamy granicę wyrażenia  $K(\theta)$ :

$$\lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{kl}} K(\theta) = -\frac{1}{2} \quad (4.29)$$

Pozostałe miejsca zerowe są dokładnie w tych samych punktach co dla źródła ze stałą amplitudą wzdłuż odcinka. Zatem szerokość głównego listka charakterystyki kierunkowej to podwojony kąt obliczony z zależności:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{2\pi}{kl}\right) \quad (4.30)$$

Jak widać zmiany rozkładów amplitud drgań poszczególnych źródeł składowych wpływają na szerokość charakterystyki kierunkowej źródła wielopunktowego.

#### 4.4. Układy źródeł dyskretnych

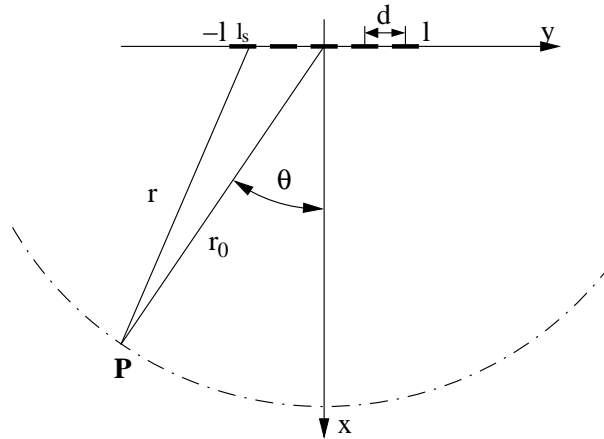
Z uwagi na trudności realizacyjne, w praktyce obecnie można spotkać jedynie źródła wielopunktowe będące aproksymacjami układów o ciągłych rozkładach drgań wzdłuż długości.

W przypadku ciągłym stosunkowo łatwo można kształtować charakterystykę kierunkową. Model, który nie uwzględnia wpływu obudowy, skończonej wielkości źródeł składowych czy newszechkierunkowej charakterystyki promieniowania każdego źródła elementarnego pozwala na budowanie prostych zależności opisujących sterowanie charakterystykami kierunkowymi.

Dyskretyzację wyliczonego rozkładu amplitud i faz wykonuje się wykorzystując model opracowany dla źródeł w postaci odcinka oraz dla układu dyskretnych źródeł punktowych równomiernie rozmieszczonych wzdłuż prostej w odległościach  $d$  od siebie. Charakterystyka kierunkowa układu źródeł jest iloczynem charakterystyki kierunkowej pojedynczego źródła i charakterystyki układu źródeł punktowych[47]. Przyjmujemy postać źródła jak na rysunku 4.7. Składa się ono z  $n$  odcinków o długości  $l_s$ . Każdy odcinek stanowi źródło liniowe z ciągłym, stałym rozkładem amplitudy i fazy drgań. Odległości między środkami odcinków wynoszą  $d$ .

Charakterystyka kierunkowa układu  $N$  źródeł punktowych umieszczonych wzdłuż odcinka prostej w jednakowych odległościach  $d$  jest opisywana następującą zależnością [47][50]:

$$K(\theta) = \frac{\sin\left(N\frac{kd}{2}\sin\theta\right)}{N\sin\left(\frac{kd}{2}\sin\theta\right)} \quad (4.31)$$



Rysunek 4.7. Schemat źródła złożonego z odcinków

Musimy pamiętać o zjawisku przestrzennego nakładania się emitowanych sygnałów (ang. *spatial aliasing*). Aby zminimalizować jego wpływ, należy unikać równomiernego rozkładu źródeł aproksymujących wyliczony rozkład faz i amplitud na źródle. O wiele lepsze wyniki daje np. logarytmiczna zmiana odległości między kolejnymi źródłami.

Literatura [47] podaje zależności opisujące charakterystykę kierunkową w przypadku dyskretnego układu źródeł promieniujących w przestrzeń nieograniczoną.

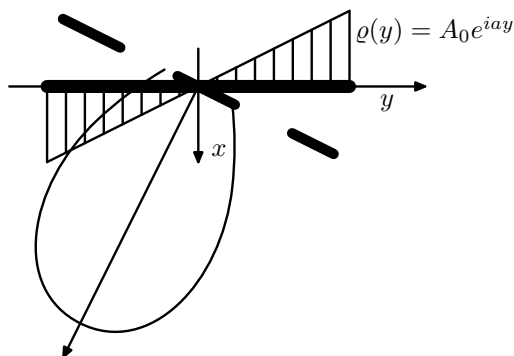
## 4.5. Uwarunkowania geometryczne

Dla źródeł o ciągłym rozkładzie drgań wzdłuż długości najistotniejsze są wymiary samego źródła. Wymiary liniowe źródła wpływają na:

- zakres częstotliwości sygnałów, dla których sterowanie daje pozytywne wyniki,
- minimalna odległość od źródła dla której efekt sterowania jest widoczny

Zakres częstotliwości jest ograniczony od dołu – wymiary źródła nie mogą być znacznie mniejsze niż długość fali. Efekt sterowania możemy uzyskać tylko i wyłącznie gdy promieniowana fala akustyczna będzie mniejsza niż wielkość źródła. Z kolei wymiary źródła określają wielkość strefy Fresnela – w której charakterystyki kierunkowości zmieniają się wraz ze zmianą odległości od źródła. Dopiero w polu dalekim (strefa Fraunhofera) charakterystyka kierunkowa jest stała. Przedstawione rozważania dotyczą tylko tej strefy i w związku z tym odległość od źródła musi być odpowiednio duża.

Dzięki zmianie fazy drgań źródeł uzyskujemy sygnały akustyczne, które rozchodzą się tak, jak sygnały pochodzące z przetworników o innej geometrii. Przy liniowej zmianie fazy drgań źródeł wzdłuż źródła następuje obrót płaskiego źródła w kierunku jak na rysunku 4.8.

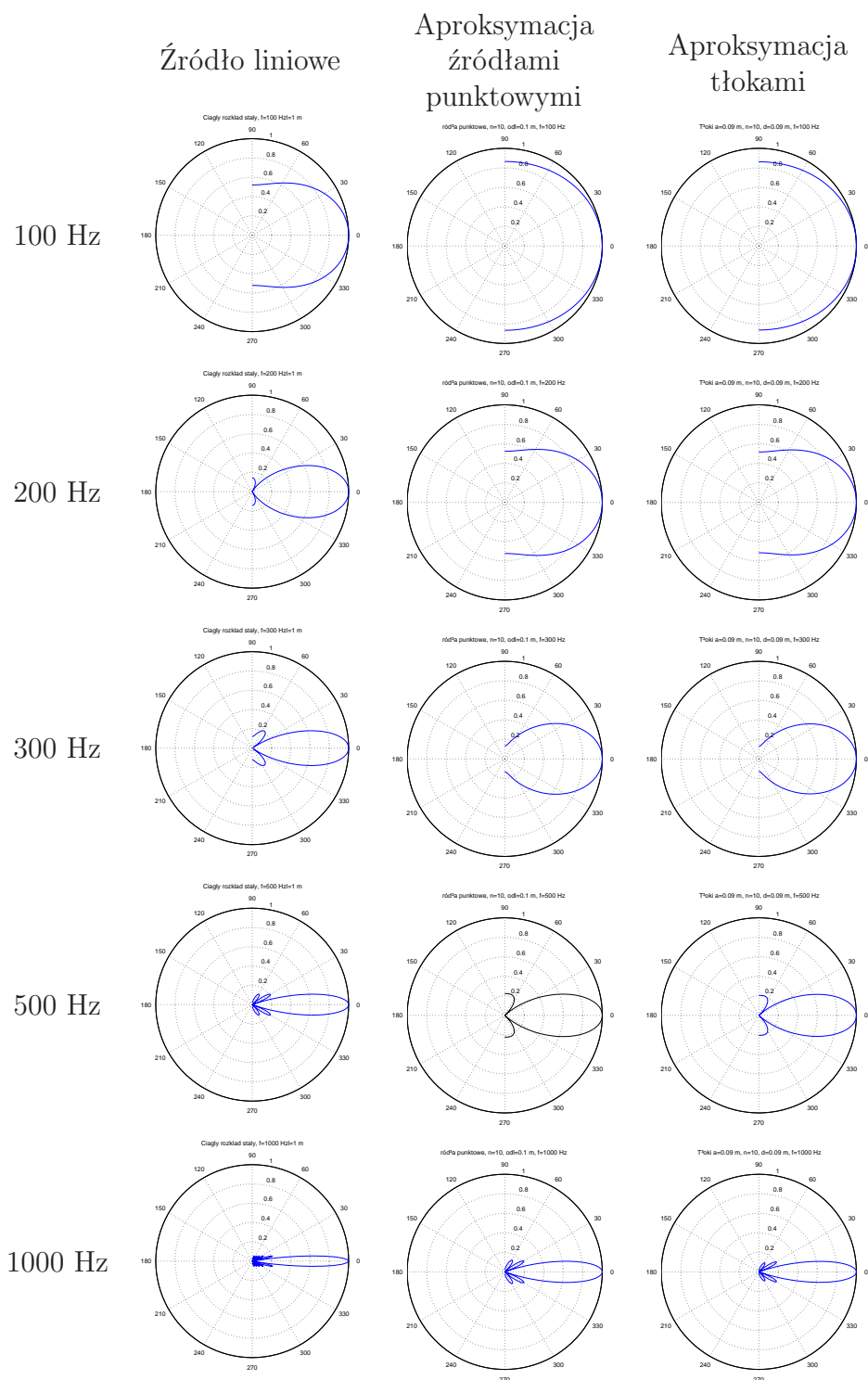


Rysunek 4.8. Pozorna zmiana geometrii źródła z liniową fazą

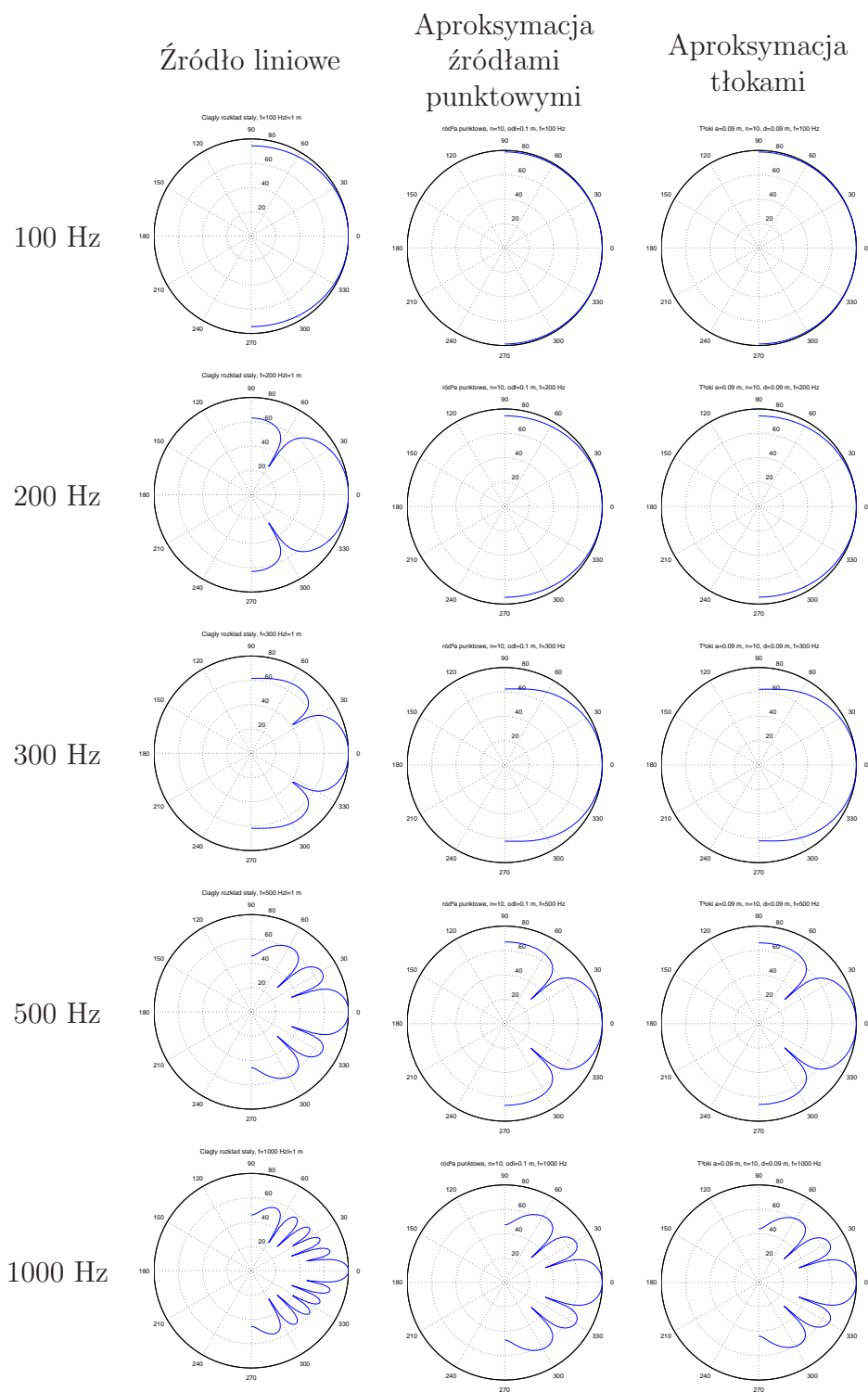
Przy czym wartość kąta skręcenia determinuje maksymalny kąt przesunięcia fazowego. Podchodząc do problemu w ten sposób otrzymujemy z analizy wynik taki zgodny z równaniem (4.21).

W rzeczywistych realizacjach nie mamy do czynienia z rozciągniętymi układami źródeł wielopunktowych ale z ich dyskretnymi aproksymacjami. Taki praktyczny układ złożony z identycznych, dyskretnych, wszechkierunkowych źródeł szerokopasmowych nazywamy *macierzą źródeł*.

Ponieważ każde wykorzystywane w źródłach liniowych elementarne źródło dźwięku posiada własną charakterystykę kierunkową, przy projektowaniu źródeł o zadanych charakterystykach kierunkowych należy uwzględnić jej wpływ na końcowy kształt charakterystyki kierunkowej. Na te zmiany nakładają się efekty związane z dyskretyzacją ciągłej funkcji opisującej rozkład amplitud i faz wzdłuż źródła co prowadzi do znacznych zmian charakterystyki kierunkowej w stosunku do zamierzonej. Na rysunkach 4.9 oraz 4.10 przedstawiono porównanie analitycznie wyliczonych charakterystyk kierunkowych dla źródła liniowego o długości 1 m. Porównano źródło w postaci odcinka złożonego ze źródeł punktowych z układem w postaci 10 źródeł punktowych rozłożonych równomiernie na długości 1m oraz układem złożonym z 10 sztywnych tłoków podobnie rozmieszczonych. W każdym z tych przypadków wszystkie źródła punktowe (lub tłoki) drgają współfazowo z taką samą amplitudą. Dla źródła ciągłego już przy częstotliwości 200 Hz pojawiają się listki boczne o poziomie niższym od listka głównego o ok. 20 dB. Dla wyższych częstotliwości sytuacja jest jeszcze gorsza. W układach dyskretnych widać listki boczne przy wyższych częstotliwościach, ale o wyższym poziomie w stosunku do listka głównego.



Rysunek 4.9. Porównanie charakterystyk kierunkowych źródła liniowego, źródła z dyskretnym rozkładem źródeł punktowych oraz układu ze źródłami w postaci sztywnych tłoków w skali liniowej



Rysunek 4.10. Porównanie charakterystyk kierunkowych źródła liniowego, źródła z dyskretnym rozkładem źródeł punktowych oraz układu ze źródłami w postaci sztywnych tłoków w skali logarytmicznej

### Uogólnienie problemu określenia charakterystyki kierunkowej

Aby wyznaczyć zależność opisującą charakterystykę kierunkową można się posłużyć tokiem obliczeń przedstawionym w poprzednich rozdziałach. Równania do rozwiązania tego problemu mają postać następującą:

Ciśnienie akustyczne wyznaczone na podstawie potencjału akustycznego:

$$p = \rho_0 \frac{\partial}{\partial t} \Phi(\theta, r, t) \quad (4.32)$$

Potencjał akustyczny dla źródła o zadanym funkcją  $\varrho(y)$  rozkładzie amplitud i przesunięć fazowych wzdłuż źródła:

$$\Phi(\theta, r, t) = \frac{-1}{ikr_0} e^{i(\omega t - kr_0)} \int_{-l}^l \varrho(y) e^{iky \sin \theta} dy \quad (4.33)$$

Zgodnie z (4.32) ciśnienie akustyczne dla tak określonego potencjału akustycznego wynosi:

$$p(\theta, r_0) = \frac{-\rho_0 \omega}{kr_0} e^{i(\omega t - kr_0)} \int_{-l}^l \varrho(y) e^{iky \sin \theta} dy \quad (4.34)$$

Charakterystyka kierunkowa określana jest jako:

$$K(\theta) = \left| \frac{p(\theta, r_0)}{p(0, r_0)} \right| \quad (4.35)$$

Ponieważ charakterystyka kierunkowa to iloraz ciśnienia w danym kierunku do ciśnienia na osi głównej, więc aby wyznaczyć równanie charakterystyki kierunkowej należy usunąć zależność od czasu i zostawić same amplitudy:

$$K(\theta) = \left| \frac{\int_{-l}^l \varrho(y) e^{iky \sin \theta} dy}{\lim_{\theta \rightarrow 0} \left[ \int_{-l}^l \varrho(y) e^{iky \sin \theta} dy \right]} \right| \quad (4.36)$$

W ten sposób otrzymaliśmy ogólną zależność opisującą charakterystykę kierunkową źródła dźwięku. Wyrażenie (4.36) pozwala na badanie charakterystyk kierunkowych źródeł w postaci ciągłych układów źródeł elementarnych. Znając rozkład amplitud i faz drgań wzdłuż źródła potrafimy określić jego kierunkowość.

## 4.6. Uzyskiwanie założonej kierunkowości

W zależności od założonej funkcji opisującej rozkład amplitud i faz wzdłuż źródła może być trudne określenie zależności pozwalających uzyskiwać założoną kierunkowość.

Dla rozkładu ze stałą amplitudą i liniową fazą problem można bardzo łatwo rozwiązać korzystając z zależności 4.21. Dla danego kąta maksymalnego promieniowania wyznaczamy wartość maksymalnego przesunięcia fazowego. Przy rozkładach z amplitudą zmienną liniowo i fazą zmienną liniowo aktualne są zależności dla źródła ze stałym rozkładem amplitud i liniowym rozkładem fazy.

**Warunki nakładane na charakterystyki kierunkowe** Pojęcie sterowania nierozzerwalnie wiąże się z celem, który należy osiągnąć. Sterowanie obiektu ma doprowadzić do pożądanego stanu sterowaną wielkość. W związku z tym, aby sterować charakterystyką kierunkową, trzeba określić kryteria tego sterowania.

Kryterium sformułowane np. w [49] to ostrość charakterystyki kierunkowej, poruszona w kontekście źródeł o dużej kierunkowości, które zdefiniowano jako: „źródło o tak dobranym rozkładzie amplitud prędkości drgań, aby promieniowanie dźwięku odbywało się wyłącznie wewnątrz określonego stożka”. Kryterium, przyjętym w sposób naturalny w tej pracy jest kąt maksymalnego promieniowania, liczony od osi głównej. Kryterium, które warto rozważyć to wartość mocy akustycznej promieniowanej przez źródło (pośrednio jest to związane z ostrością charakterystyki kierunkowej). Realizacja wielopunktowego źródła dźwięku o sterowanej charakterystyce wiąże się ze spełnieniem wybranych z wymienionych kryteriów.

Postawmy problem w sposób następujący: *Dla pasma częstotliwości  $f_D \leq f \leq f_G$ , charakterystyka kierunkowa ma mieć maksimum przy zadanym kącie  $\theta_s$ . Należy ustalić warunki, które musi spełnić rozkład faz wzdłuż źródła dla częstotliwości z podanego zakresu aby zrealizować zadaną charakterystykę kierunkową*

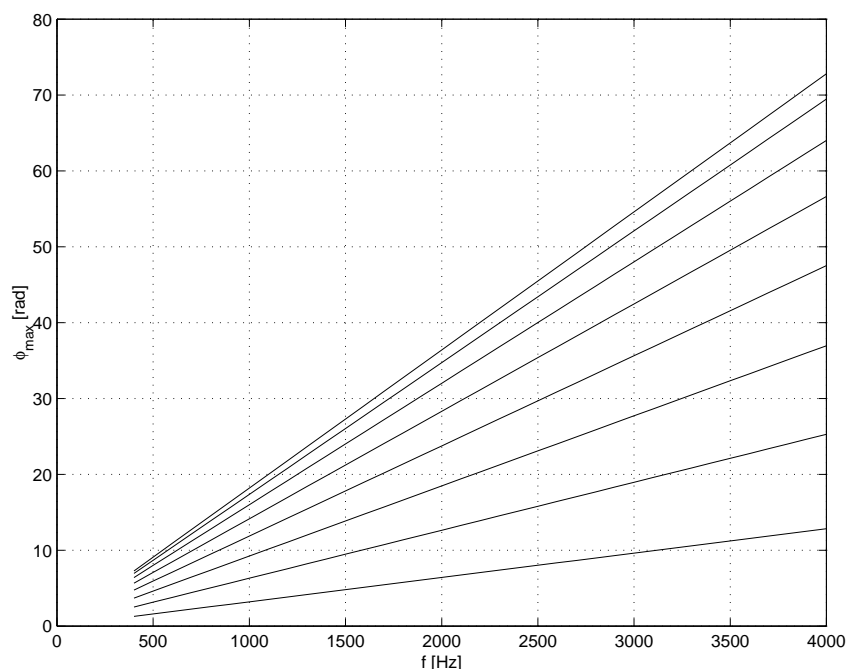
Jeżeli weźmiemy pod uwagę tylko źródło z liniowym rozkładem fazy wzdłuż długości to z zależności (4.21) wynika, że:

$$\sin \theta = -\frac{\phi_{max}}{kl} = -\frac{\phi_{max}c}{2\pi lf}$$

czyli zależność maksymalnego przesunięcia fazowego  $\phi_{max}$  od częstotliwości da się opisać wzorem:

$$\phi_{max}(f) = -\frac{2\pi l \sin \theta}{c} f \quad (4.37)$$

W przypadku liniowej zmienności fazy wzdłuż źródła uzyskujemy liniową zależność między maksymalnym kątem przesunięcia fazowego i częstotliwością. Ze względu na łatwość uzyskania liniowej fazy jest to bardzo wygodna zależność. Można pokusić się o zaprojektowanie filtrów o skończonej odpowiedzi impulsowej (FIR), realizujących taką zmienność przesunięcia fazowego z częstotliwością [31].



Rysunek 4.11. Zależność wartości  $\phi_{max}$  od częstotliwości dla kątów od  $10^\circ$  do  $80^\circ$  co  $10^\circ$

## 4.7. Stała charakterystyka kierunkowa

W przypadku sterowania rozkładem pola akustycznego generowanego przez wielopunktowe źródła dźwięku stosunkowo proste jest uzyskanie zakładanych rezultatów dla jednej określonej częstotliwości. Jeżeli mamy do czynienia z taką sytuacją, zjawiska falowe umożliwiają takie kształtowanie pola akustycznego, by uzyskiwać zmiany poziomów ciśnienia akustycznego o kilkanaście decybeli np. „strefy ciszy” – dla układów aktywnej redukcji hałasu. Niestety w sytuacji, gdy należy osiągnąć efekt sterowania charakterystyką kierunkową dla sygnałów zawierających więcej składowych częstotliwościowych o widmie ciągłym, napotykamy znaczne trudności. Rochodzenie się w przestrzeni fal promieniowanych przez poszczególne przetworniki mechanoakustyczne powoduje iż dla poszczególnych częstotliwości obszary przestrzennych wzmocnień i tłumień sygnału będą się nakładać. Ostrość i liczbę listków bocznych charakterystyki kierunkowej będzie rosła z częstotliwością. Oprócz tego, na skutek dyskretyzacji ciągłego źródła liniowego pojawiają się „listki boczne” o amplitudach ciśnienia akustycznego równych amplitudom dla listka głównego. W ten sposób znaczna część energii akustycznej będzie promieniowana w kierunkach odbiegających od zakładanego. W związku z tym konieczne staje się takie zaprojektowanie wielopunktowego źródła dźwięku by uzyskiwać stałą charakterystykę kierunkową w szerokim zakresie częstotliwości. Pod pojęciem „szeroki zakres częstotliwości” rozumiemy

zakres spełniający wymagania stawiane źródłu w konkretnej aplikacji (oktawa lub kilka oktaw). W literaturze [20][42] można znaleźć kilka metod uzyskiwania stałej (lub częściowo stałej) charakterystyki kierunkowej źródeł wielopunktowych.

### Uzyskiwanie stałej kierunkowości

Znana zależność na ciśnienie akustyczne na kierunku  $\theta$  w odległości  $r$  od środka źródła złożonego z  $N = 2M + 1$  źródeł składowych, może zostać przedstawiona w następujący sposób:

$$p(\Omega, \theta, r) = R(\omega, r) \sum_{l=-M}^M w_l e^{il\Omega} \quad (4.38)$$

gdzie:

$$\Omega = kd \sin \theta$$

$$R(\omega, r) = \frac{e^{-ikr}}{r}$$

$w_l$  jest wagą przypisaną danemu źródłu składowemu

Problem uzyskiwania stałej charakterystyki w wybranym paśmie częstotliwości można ująć w kategoriach właściwego doboru współczynników  $w_l$  w funkcji częstotliwości. Według [1] można współczynniki  $w_l$  wyznaczyć wykorzystując funkcje Bessela:

$$w_l = \frac{J_l(z)}{\sigma} \quad (4.39)$$

gdzie  $J_l(z)$  jest funkcją Bessela pierwszego rodzaju, rzędu  $l$ ,  $z$  musi być odpowiednio dobrane, zaś  $\sigma$  jest stałą normalizującą tak dobraną, by  $\max |w_l| = 1$ . Można wykazać [1], iż dla źródeł składających się z bardzo dużej ilości źródeł elementarnych charakterystyka i ciśnienie akustyczne nie zależą od wyboru  $z$ . Dla praktycznie realizowanych konstrukcji konieczne jest odpowiednie wybranie parametru  $z$ . Optymalna wartość parametru  $z$  ze względu na wprowadzane nierównomierności charakterystyki kierunkowej wynosi:

$$z = M + 1 - \sqrt[3]{M + 1} \quad (4.40)$$

Wzmocnienia dobierane tą metodą zapewniają najmniejszą nierównomierność charakterystyki kierunkowej w funkcji częstotliwości

Wyznaczając w ten sposób wzmocnienia poszczególnych źródeł składowych możemy uzyskiwać stałą charakterystykę kierunkową w wybranym paśmie częstotliwości. Opisaną metodą wyznaczono współczynniki wzmocnienia dla źródła składającego się z 9 źródeł elementarnych przedstawione w poniższej tabeli (4.2).

Wadą takiej metody uzyskiwania stałej charakterystyki kierunkowej jest obniżenie mocy akustycznej promieniowanej przez źródła w stosunku do źródła w którym wszystkie źródła składowe emitują jednakową moc. Ze względu na znany fakt, iż ostateczna charakterystyka kierunkowa jest iloczynem charakterystyki kierunkowej układu źródeł (przy założeniu źródeł punktowych) i charakterystyki kierunkowej pojedynczego źródła,

| Nr źródła | Współczynnik wzmocnienia |
|-----------|--------------------------|
| 1         | 0.36098                  |
| 2         | -0.74628                 |
| 3         | 1.00000                  |
| 4         | -0.46952                 |
| 5         | -0.71458                 |
| 6         | 0.46952                  |
| 7         | 1.00000                  |
| 8         | 0.74628                  |
| 9         | 0.36098                  |

Tabela 4.2. Wartości wzmocnień dla poszczególnych źródeł źródła wielopunktowego

otrzymana charakterystyka pozwala na budowę źródła o charakterystyce odpowiadającej charakterystyce kierunkowej pojedynczego źródła.

Poniżej przedstawiono inne sposoby uzyskiwania stałej charakterystyki kierunkowej w pewnym zakresie częstotliwości.

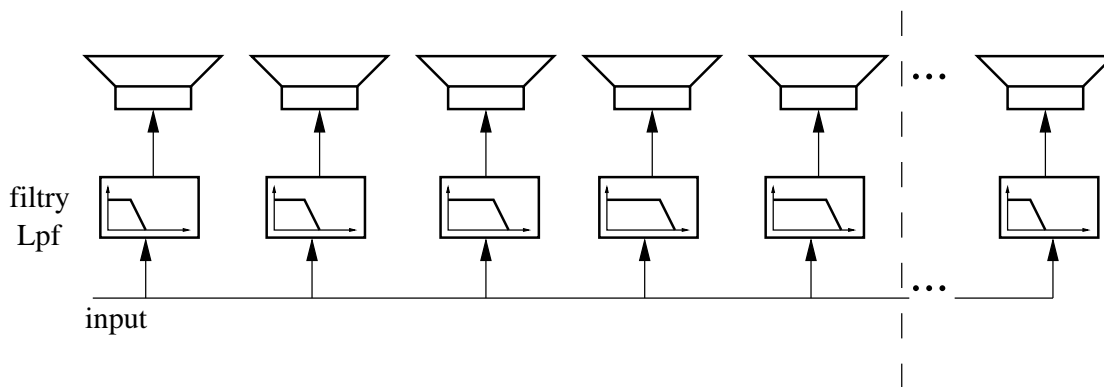
*Zagnieżdżanie harmoniczne* Stałą charakterystykę kierunkową w szerokim paśmie częstotliwości można uzyskać wykorzystując dwa (lub więcej) współliniowe źródła wielopunktowe. Przy czym konieczne jest zachowanie skalowania odległości między źródłami zgodnie z ilorazem częstotliwości, przy których powinny pracować poszczególne „podźródła” wielopunktowe. Ta technika jest w literaturze nazywana techniką SHA od nazwisk Smitha[40], Hixsona i Au [28]. Stałą charakterystykę kierunkową uzyskuje się przez sumowanie sygnału emitowanego przez pierwsze źródło wielopunktowe posiadające pewną, pożądaną charakterystyką kierunkową dla częstości  $\omega_0$  z sygnałem pochodzącym z drugiego źródła wielopunktowego,  $C$  razy mniejszego, emitującego sygnał o częstości  $C\omega_0$ . W przypadku gdy  $C = 2$ , otrzymamy metodę zwaną harmonicznym zagnieżdżaniem. W tej metodzie aby uzyskać stałą charakterystykę kierunkową w szerokim paśmie częstotliwości sygnały o coraz wyższych częstotliwościach są emitowane przez źródła wielopunktowe o coraz mniejszych wymiarach liniowych. Gdy przyjmiemy  $C = 2$  uzyskujemy najpraktyczniejsze rozwiązanie – przy zagnieżdżaniu co drugi element jest wykorzystywany w dwu lub więcej „podźródłach” wielopunktowych. Metoda zagnieżdżania harmonicznego pozwala na zmniejszenie zmienności charakterystyki kierunkowej do takiej jaka występuje w przedziale jednej oktawy.

*Filtrowanie dolnoprzepustowe dla poszczególnych elementów*[20] Stałą charakterystykę kierunkową można uzyskać przez umieszczenie filtrów dolnoprzepustowych w torach sygnału zasilającego poszczególne źródła elementarne źródła wielopunktowego. Częstotliwości odcięcia zależą od położenia poszczególnych źródeł elementarnych wzdłuż źródła wielopunktowego. Im źródło dalej od środka źródła wielopunktowego tym niższa częstotliwość odcięcia filtra dolnoprzepustowego. Wykorzystanie filtrów dolnoprzepustowych powoduje,

że składowe o niskich częstotliwościach wielopunktowe źródło dźwięku będzie promieniowało całą swoją długością, natomiast składowe o coraz wyższych częstotliwościach będą promieniowane przez coraz „krótsze” źródło wielopunktowe – przez coraz mniej źródeł elementarnych (skupionych wokół geometrycznego środka źródła wielopunktowego).

*Cieniowanie* [3][45] [*ang.* shading] odnosi się do zmiany wzmocnień sygnałów doprowadzonych do poszczególnych źródeł w kolumnie. Modyfikacje przeprowadza się w taki sposób, by źródła najbardziej odległe od osi symetrii kolumny były zasilane sygnałem o najmniejszym wzmocnieniu, zaś źródła leżące najbliżej tej osi były wysterowane sygnałem o największym wzmocnieniu. Dla każdej częstotliwości osobno. Realizacja tej metody kształtowania charakterystyki kierunkowej wymaga zastosowania filtrów dolnoprzepustowych. W linii zasilającej każde źródło elementarne umieszczamy jeden filtr. Im dalej od środka tym częstotliwości odcięcia są niższe. Dla sygnałów o niskiej częstotliwości pracują wszystkie źródła elementarne – dla coraz wyższych fragment coraz bliżej geometrycznego środka źródła. Cały układ projektujemy w ten sposób by długość źródła wyrażona w długościach fali emitowanej była stała.

Terminem zwężanie [3] [*ang.* tapering] określa się do używania filtrów dolnoprzepustowych. W sterowaniu rozkładem pola akustycznego generowanego przez wielopunktowe źródła dźwięku zwężania stosuje się, by uzyskać długość źródła zależną od częstotliwości (patrz rysunek 4.12). Otrzymuje się je w ten sposób: do każdego źródła stosuje się filtr dolnoprzepustowy, ale z różnymi częstotliwościami odcięcia. Częstotliwości odcięcia filtrów przy źródłach leżących najdalej od osi symetrii kolumny są najniższe, w filtrach przy źródłach leżących przy osi symetrii kolumny częstotliwości odcięcia są wyższe.



Rysunek 4.12. Schemat zmian częstotliwości odcięcia filtrów dolnoprzepustowych przy wygładzaniu

**Realizacja stałej charakterystyki kierunkowej** nie jest łatwym zadaniem. Z uwagi na fizyczne aspekty promieniowania układów źródeł, dla wyższych częstotliwości musi dochodzić do zwężania szerokości charakterystyki kierunkowej.

Przyjmując następujące dane wejściowe:

- liczba źródeł  $M = 2N + 1$ ,
- odległość między źródłami  $d$ ,
- opóźnienie sygnału między źródłami spowodowane nieciągłością źródła wielopunktowego  $\tau_0 = d/c$

można zbudować układ o quasi stałej charakterystyce kierunkowej w szerokim paśmie częstotliwości.

Algorytm jest przedstawiony na rysunku 4.13. Jako pierwszy krok konieczne jest określenie wymaganej szerokości charakterystyki kierunkowej  $\theta_w$ . W gruncie rzeczy jest to tylko połowa charakterystyki, całkowitą szerokość listka głównego stanowi podwojony kąt  $\theta_w$ . Następnie określamy dolną częstotliwość, dla której jeszcze można uzyskać wymagany efekt.

$$f_d = \frac{1}{M\tau_0 \sin \theta_w} \quad (4.41)$$

Ponieważ źródło jest symetryczne i składa się z  $2N + 1$  źródeł składowych – można uzyskać  $N - 1$  różnych długości symetrycznego źródła wielopunktowego. Jego najmniejsza długość będzie wynosiła  $M = 1$ . W związku z tym określa się  $N$  częstotliwości, powyżej których będzie realizowane wyłączanie sygnału transmitowanego w poszczególnych źródłach.

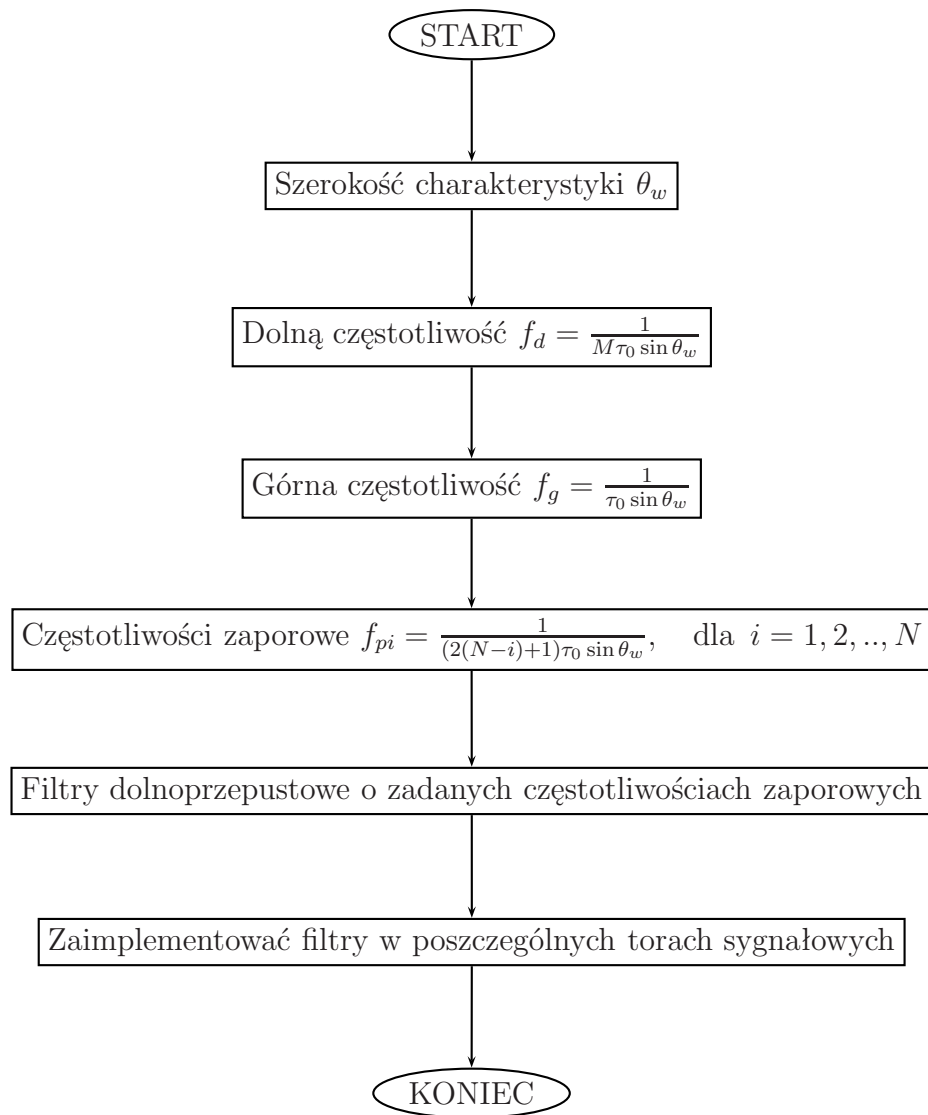
$$f_{pi} = \frac{1}{(2(N - i) + 1)\tau_0 \sin \theta_w}, \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, N \quad (4.42)$$

$$f_g = \frac{1}{\tau_0 \sin \theta_w} \quad (4.43)$$

Następnym krokiem jest synteza filtrów dolnoprzepustowych o wyznaczonych częstotliwościach odcięcia. Filtry są aplikowane w ten sposób, iż filtry o najniższych częstotliwościach pasma zaporowego znajdują się najbliżej końców źródła (symetrycznie względem środka). Następnie filtry o wyższych częstotliwościach odcięcia i tak aż do sytuacji, gdzie zostaje źródło złożone z 1 źródła składowego.

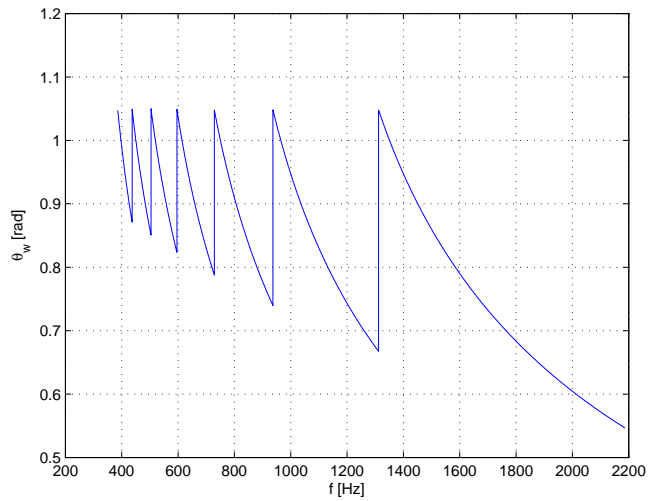
Wykres zależności kąta  $\theta_w$  w funkcji częstotliwości przedstawia rysunek 4.14. Projektowano źródło o szerokości charakterystyki kierunkowej równej  $2\pi/3$ , czyli połowa wynosi  $\pi/3$ . Odległości między źródłami wynosiły 0,06 m, liczba źródeł  $M = 9$ . Rysunek pokazuje nierównomierność charakterystyki kierunkowej w funkcji częstotliwości. Niemniej uzyskana charakterystyka kierunkowa posiada znacznie mniejszą zmienność, niż źródło bez zastosowania filtrów dolnoprzepustowych.

Słabością opisanych metod jest konieczność zbudowania źródła składającego się z wielu elementów promieniujących falę akustyczną. O ile w zakresie ultradźwięków można taki efekt uzyskać przy stosunkowo niewielkich rozmiarach źródła to w zakresie słyszalnych częstotliwości rozmiary źródła muszą osiągać znaczne wielkości. Tak więc do chwili gdy



Rysunek 4.13. Algorytm uzyskiwania stałej charakterystyki kierunkowej

nie zostaną zbudowane źródła dźwięku o wielu sterowanych źródłach elementarnych i niewielkich rozmiarach będziemy napotykać znaczne problemy z wykorzystaniem tych metod do sterowania rozkładem pola akustycznego w zakresie częstotliwości słyszalnych.



Rysunek 4.14. Przebieg zmian szerokości charakterystyki kierunkowej źródła w funkcji częstotliwości

## 4.8. Podsumowanie

W niniejszym rozdziale zamieszczono zależności pozwalające na zbudowanie wielopunktowego źródła dźwięku o sterowanej charakterystyce kierunkowej. Część z wprowadzonych zależności ma charakter oryginalny, część pochodzi z literatury. Sterowane źródło dźwięku pozwala na uzyskanie maksimum promieniowania w zadanym kierunku, jednocześnie uzyskując znacznie większą stałość charakterystyki kierunkowej w funkcji częstotliwości niż źródła bez układu sterowania. W dokonano syntezy algorytmu pozwalający na uzyskiwanie prawie stałej charakterystyki kierunkowej.

## 5. Wpływ kierunkowości źródła na rozkład pola akustycznego

### 5.1. Wrażliwość parametrów pola akustycznego na zmiany charakterystyk kierunkowych źródła

„Przez pole akustyczne rozumiemy obszar przestrzeni, w którym istnieją (rozchodzą się) fale akustyczne” [16] czyli objętość środowiska o właściwościach sprężystych, w którym występują drgania tegoż sprężystego ośrodka. Pole akustyczne najczęściej jest opisywane w postaci pola ciśnienia akustycznego – wielkości związanej z prędkością akustyczną opisującą zmiany ciśnienia ośrodka w stosunku do statycznego ciśnienia panującego w nim. Nie jest to jedyny sposób opisu pola akustycznego. Z punktu widzenia termodynamiki pole akustyczne to obszar w którym zachodzą przemiany termodynamiczne ośrodka (np. gazu) w związku z tym do opisu pola akustycznego można by wykorzystać znane parametry termodynamiczne. Niemniej praktyka dowiodła iż ciśnienie akustyczne jest najwygodniejszym sposobem opisu pola akustycznego. Można zatem powiedzieć, że rozkład pola akustycznego jest równoważny z rozkładem ciśnienia akustycznego w wybranym obszarze.

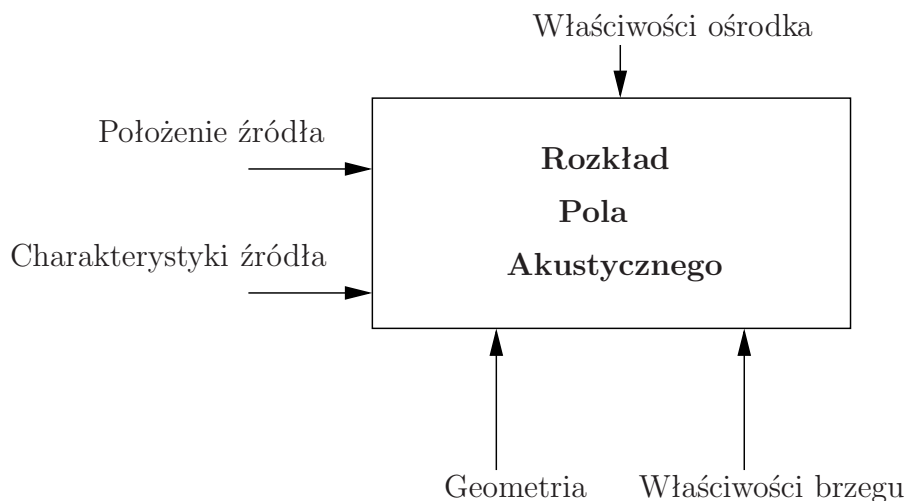
Oczywiście w trakcie badania pola akustycznego można w razie potrzeby korzystać z bardziej skomplikowanych miar jak na przykład miary zrozumiałości mowy STI czy RASTI. Rodzaj wielkości wybranej do opisu pola będzie determinował cel, który zamierzamy osiągnąć.

Przez sterowanie rozkładem pola akustycznego rozumiemy uzyskiwanie zadanej wartości ciśnienia akustycznego przy zadanej strukturze częstotliwościowej w wybranych punktach pola lub też przebiegu czasowego ciśnienia akustycznego w wybranych punktach analizowanego obszaru.

Zgodnie ze schematem 5.1 rozkładem pola akustycznego można sterować zmieniając wartości następujących wielkości:

- właściwości ośrodka
- umiejscowienia źródeł drgań akustycznych,
- właściwości samych źródeł akustycznych.
- warunków na brzegu analizowanego obszaru,
- geometrii obszaru w którym zachodzą drgania

Na właściwości ośrodka (powietrze) mamy niewielki wpływ – możemy zmieniać co naj-



Rysunek 5.1. Model fenomenologiczny sterowania rozkładem pola akustycznego

wyżej jego skład np. zawartość pary wodnej. W wielu przypadkach na etapie projektowania pomieszczeń pod kątem akustycznym możemy w pewnym zakresie wpływać na geometrię obszaru w którym rozchodzą się drgania akustyczne. Podobnie możemy wpływać, w ograniczonym zakresie, na materiały umieszczane na granicy obszaru. Chociaż tu napotykamy wiele problemów związanych z zapewnieniem właściwych warunków oświetleniowych, estetycznych, przeciwpożarowych (i innych). Zatem czasami możemy modyfikować warunki panujące na brzegu pola akustycznego, podobnie jak samo położenie źródeł, co pozwala na sterowanie rozkładem pola akustycznego. W sytuacji, która często występuje w praktyce inżynierskiej, nie możemy ingerować w geometrię obszaru i położenie źródeł. W takich sytuacjach pozostaje nam sterowanie rozkładem pola akustycznego przez zmianę charakterystyk samych źródeł dźwięku.

Najbardziej oczywistym sposobem sterowania polem akustycznym przy pomocy źródła, jest zmiana mocy akustycznej źródła. Taka modyfikacja prowadzi do zmiany poziomu ciśnienia akustycznego w analizowanym obszarze. Ten sposób sterowania rozkładem pola akustycznego jest w praktyce niezwykle często stosowana do osiągnięcia efektów m.in. estetycznych polegających na zmianie poziomu sygnału i związanych z tym wrażeń słuchaczy.

Z punktu widzenia sterowania rozkładem pola akustycznego w wybranym obszarze, najbardziej przydatna jest charakterystyka zewnętrzna (polowa) źródła [16]. Dla sygnałów sinusoidalnych charakterystykę zewnętrzną źródła określamy przez iloraz bezwzględnej wartości ciśnienia akustycznego na osi głównej źródła do wartości ciśnienia akustycznego w punkcie leżącym pod kątem  $\theta$  do osi głównej w odległości  $r$ . Ważne jest by odległość punktów pomiarowych od akustycznego środka źródła była jednakowa [5][2]. Ponieważ

większość praktycznie występujących źródeł można sprowadzić do obrotowej powierzchni drgającej, za oś główną wybiera się oś symetrii źródła, natomiast zwrot ustala się w stronę największego promieniowania.

W celu opisanie tej charakterystyki wprowadza się pojęcie wskaźnika kierunkowości i definiuje się go jako wartość bezwzględną ilorazu ciśnienia akustycznego  $p$  w danym kierunku i ciśnienia akustycznego  $p_g$  na osi głównej w tej samej odległości od źródła. Tak uzyskaną charakterystykę nazywamy charakterystyką kierunkową (niektórzy autorzy [4][46] używają określenia charakterystyką kierunkowości) źródła. Charakterystyki kierunkowe wyznacza się dla pola dalekiego. Jeżeli wprowadzimy biegunowy układ współrzędnych  $(r, \theta, \phi)$  możemy tą definicję zapisać następująco [16]:

$$R = \left| \frac{p(r, \theta, \phi)}{p_g} \right|_{r=\text{const}} = \left| \frac{p(r, \theta, \phi)}{p(r, 0, 0)} \right| \quad (5.1)$$

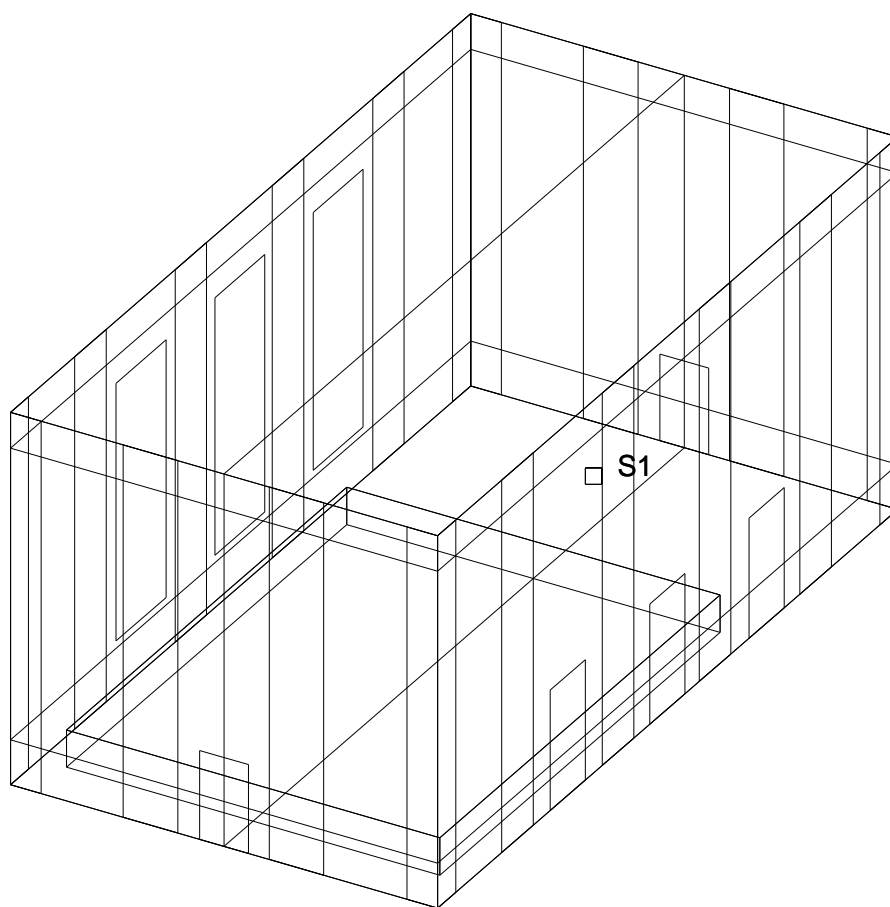
Kierunek maksimum promieniowania źródła zazwyczaj pokrywa się z osią główną. Wobec tego zmiana orientacji źródła w stosunku do badanego obszaru zmienia rozkład pola akustycznego. Pojawia się pytanie: w jaki sposób zmienia się rozkład pola akustycznego przy zmianie ostrości charakterystyki kierunkowej (kąta w którym źródło promieniuje największą część energii akustycznej).

W celu udzielenia odpowiedzi na tak postawione pytanie przeprowadzono eksperyment cyfrowy, w trakcie którego badano wpływ ostrości charakterystyki kierunkowej źródła umieszczonego w zamkniętym pomieszczeniu na rozkład pola akustycznego w tymże pomieszczeniu.

Jako metodę badawczą wybrano eksperyment cyfrowy z uwagi na łatwość uzyskiwania porównywalnych wyników. Przy zachowaniu tych samych warunków symulacji i zmianie jedynie jednego z parametrów – ostrości charakterystyki kierunkowej. Jako miarę przy tworzeniu rozkładu pola akustycznego wykorzystano wskaźnik zrozumiałości mowy (STI) oraz poziom ciśnienia akustycznego (SPL). Obliczenia wykonano przy wykorzystaniu programu RAYNOISE służącego do analizy pola akustycznego metodami geometrycznymi.

Jako pomieszczenie wybrano aulę AGH w pawilonie A-0 [34]. Przyjęto prostopadłościenny kształt pomieszczenia. Pominięto wnęki w ścianach, obrazy, pominięto trybunę i katedrę. Uwzględniono słuchaczy siedzących na krzesłach w środkowej części auli (patrz rysunek 5.2).

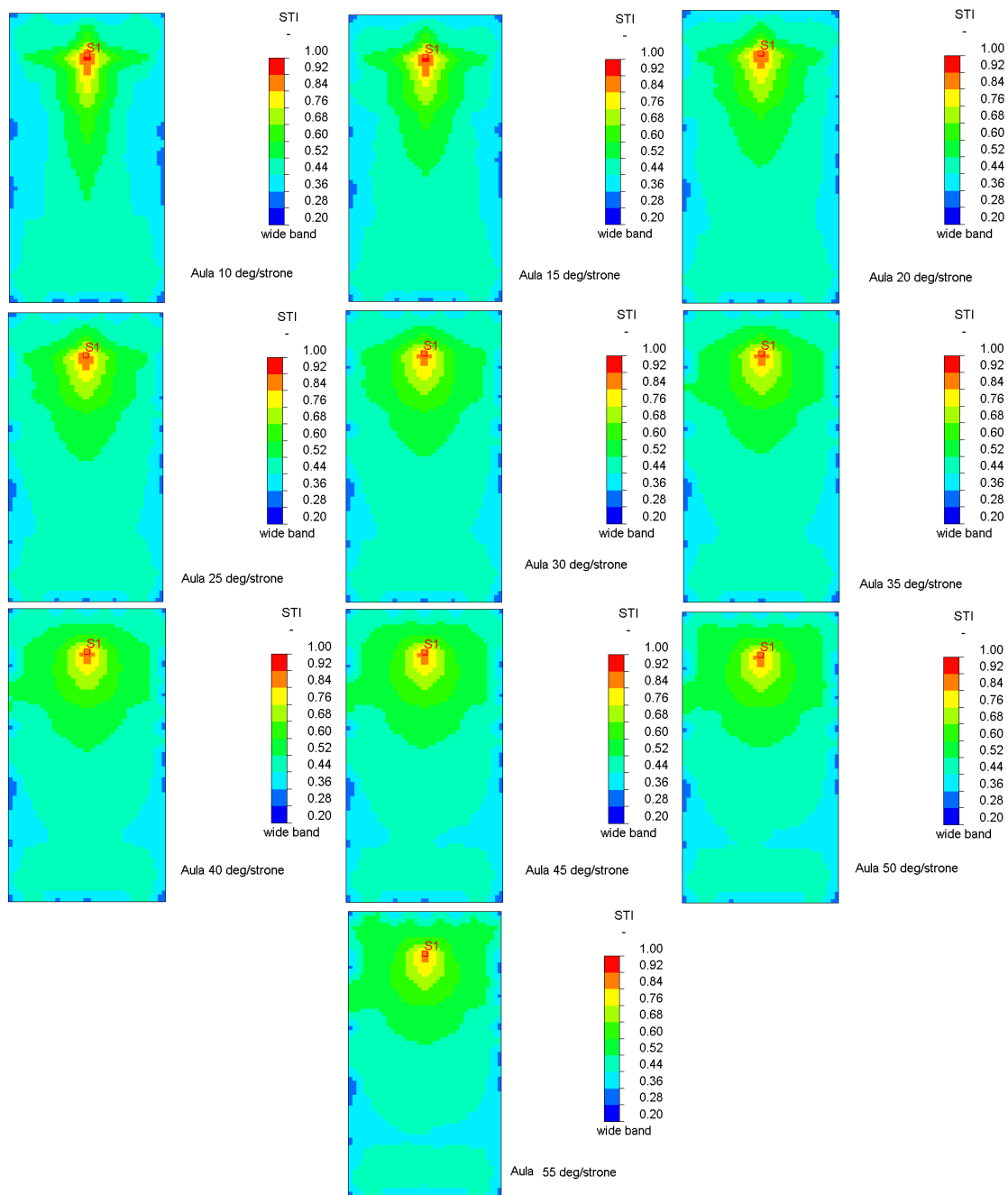
Jedno źródło oznaczone S1 umieszczono w ok. 1/5 długości sali, w połowie jej szerokości, na wysokości 1,7 m co odpowiada położeniu mówcy. Powierzchnia pomiarowa znajdowała się na wysokości 1,2 m. Słuchacze siedzący na krzesłach w środkowej części sali w modelu zostali uwzględnieni w postaci prostopadłościanu o wysokości 1 m i współczynnikiem pochłaniania odpowiadającym dwóm osobom na metr kwadratowy[50]. Współczynniki pochłaniania dla ścian przyjęto dla twardej powierzchni odbijającej  $\alpha_r = 0,04$ . W wykorzystanym pakiecie RAYNOISE [36] charakterystykę kierunkową można modelować przez podanie parametru *3dBCutting*, czyli ostrości charakterystyki kierunkowej. Wielkość



Rysunek 5.2. Geometryczny model pomieszczenia

*3dBCutting* oznacza kąt, przy którym następuje zmniejszenie poziomu ciśnienia akustycznego w danym kierunku o 3 dB. W trakcie obliczeń charakterystyka jest modelowana przez tak dobrany fragment kardioidy, by uzyskać odpowiednią ostrość charakterystyki kierunkowej – by na kierunku leżącym pod zadaniem kątem w stosunku do osi głównej następował spadek poziomu ciśnienia akustycznego o 3 dB. Obliczenia wykonane zostały dla całego dostępnego w obliczeniach pasma częstotliwości, czyli dla pasm oktaowych o częstotliwościach środkowych od 63 Hz do 8000 Hz. Dla uniknięcia niejednoznaczności przyjęto, iż charakterystyki kierunkowe źródła pobudzającego ośrodek do drgań są jednakowe w całym analizowanym paśmie częstotliwości. Parametr ostrości charaktery-

styki kierunkowej źródła zmieniano w zakresie od  $10^\circ$  do  $55^\circ$  z krokiem wynoszącym  $5^\circ$ . Obliczenia zostały wykonane w węzłach siatki liczącej 30 na 60 czyli 1800 węzłów.



Rysunek 5.3. Rozkład wskaźnika zrozumiałości mowy (STI) dla różnych ostrości charakterystyki kierunkowej źródła w pomieszczeniu

Wyniki zostały zobrazowane w postaci barwnych rozkładów przedstawiających interpolację wartości odpowiednich miar (STI lub SPL) w węzłach na całej powierzchni pomiarowej. Rysunki 5.3 oraz 5.4 przedstawiają rozkład wskaźnika STI oraz wartości SPL dla różnych ostrości charakterystyk kierunkowych źródła. Została dobrana jednolita skala barwna dla wszystkich symulacji, dzięki czemu łatwo jest analizować przedstawione wyniki. Jak widać na przedstawionych rysunkach, przy zmianie ostrości charakterystyki kierunkowej źródła znacząco zmienia się rozkład pola akustycznego w pomieszczeniu.

Im większa ostrość charakterystyki kierunkowej źródła, tym lepsza zrozumiałość mowy (mierzona wskaźnikiem STI) na osi głównej w większej odległości od źródła. Jednocześnie wraz ze spadkiem ostrości charakterystyki kierunkowej (coraz bardziej wszechkierunkowe źródło) następuje poszerzenie obszaru dobrej zrozumiałości. Gdy zwiększa się szerokość listka głównego charakterystyki kierunkowej obszar dobrej zrozumiałości ulega poszerzeniu i znajduje się bliżej źródła dźwięku.

Wyniki przedstawione na rysunkach 5.3 oraz 5.4 jednoznacznie wskazują na wpływ kształtu charakterystyki kierunkowej na rozkład pola akustycznego w pomieszczeniu. Identyczne zjawisko występuje gdy mamy do czynienia z przestrzenią otwartą – charakterystyka kierunkowa źródła dźwięku znacząco wpływa na rozkład pola akustycznego generowanego przez to źródło.

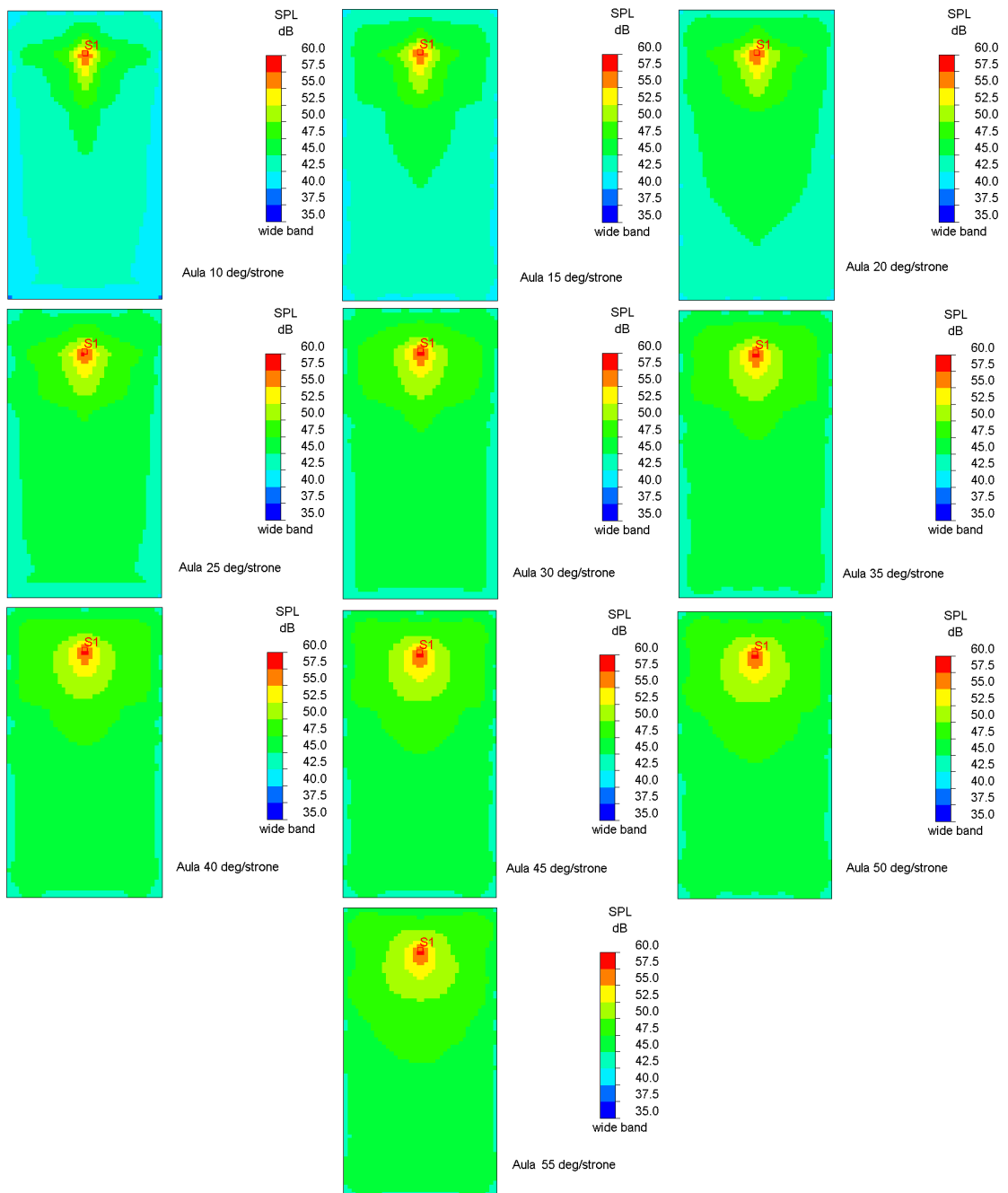
**Należy stwierdzić, iż istnieje możliwość sterowania rozkładem pola akustycznego na drodze zmian charakterystyki kierunkowej źródła dźwięku**

Zatem problem sterowania dźwiękiem rozumiany jako sterowanie rozkładem pola akustycznego można rozwiązać między innymi przy pomocy specjalnie dobranych źródeł dźwięku. W szczególności wielopunktowe (liniowe, płaskie, przestrzenne) źródła dźwięku mają duże możliwości modyfikacji struktury przestrzennej pola akustycznego generowanego przez nie.

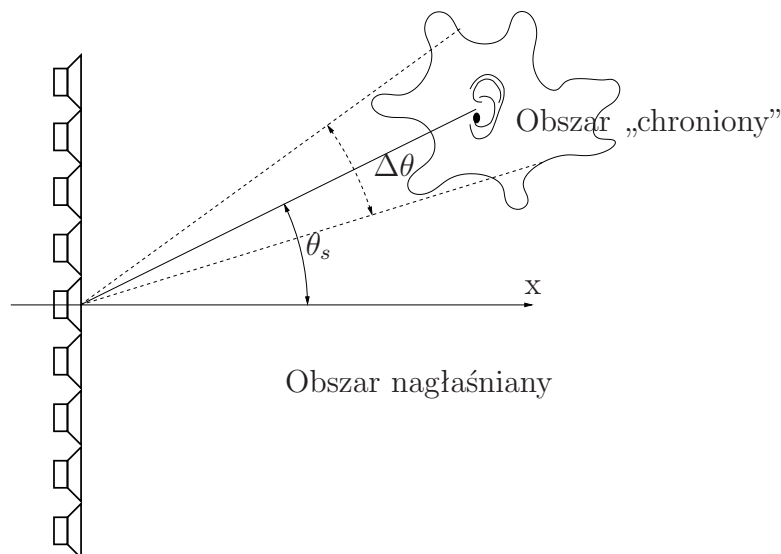
## **5.2. Sterowanie rozkładem pola akustycznego przez zmianę charakterystyki kierunkowej źródła**

Jak wykazano w poprzednim rozdziale sterowanie rozkładem pola akustycznego generowanego przez wielopunktowe źródła dźwięku jest możliwe i może być zrealizowane w postaci sterowania charakterystyką kierunkową. W omawianym układzie sterowania wielkościami wejściowymi będą przesunięcia fazowe (opóźnienia) i amplitudy sygnałów emitowanych przez poszczególne źródła składowe. Efektem sterowania będzie zmiana kierunku maksimum promieniowania (wcześniej omówiony kąt sterowania). Problem sterowania rozkładem pola akustycznego generowanego przez wielopunktowe źródło dźwięku ilustruje rysunek 5.5.

Obszar pola akustycznego został podzielony na dwie części umownie nazwane: obszar nagłaśniany oraz obszar „chroniony”. Obszar nagłaśniany jest fragmentem przestrzeni, w którym wybrane parametry pola akustycznego powinny przyjmować zadane wartości.



Rysunek 5.4. Rozkład poziomy ciśnienia akustycznego (SPL) dla różnych ostrości charakterystyki kierunkowej źródła w pomieszczeniu

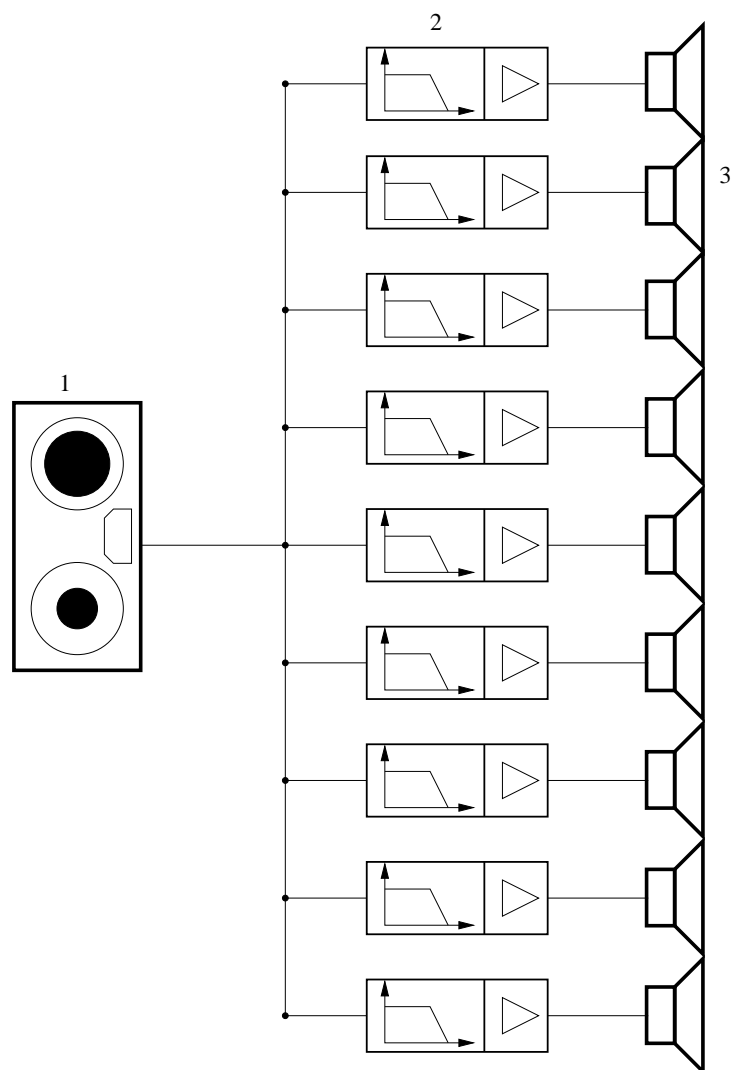


Rysunek 5.5. Schemat sterowania polem akustycznym

Obszar „chroniony” to obszar, w którym chcemy zminimalizować energię akustyczną promieniowaną przez źródło. W zależności od aplikacji wymagania stawiane parametrom pola w tych obszarach będą różne. I tak na przykład:

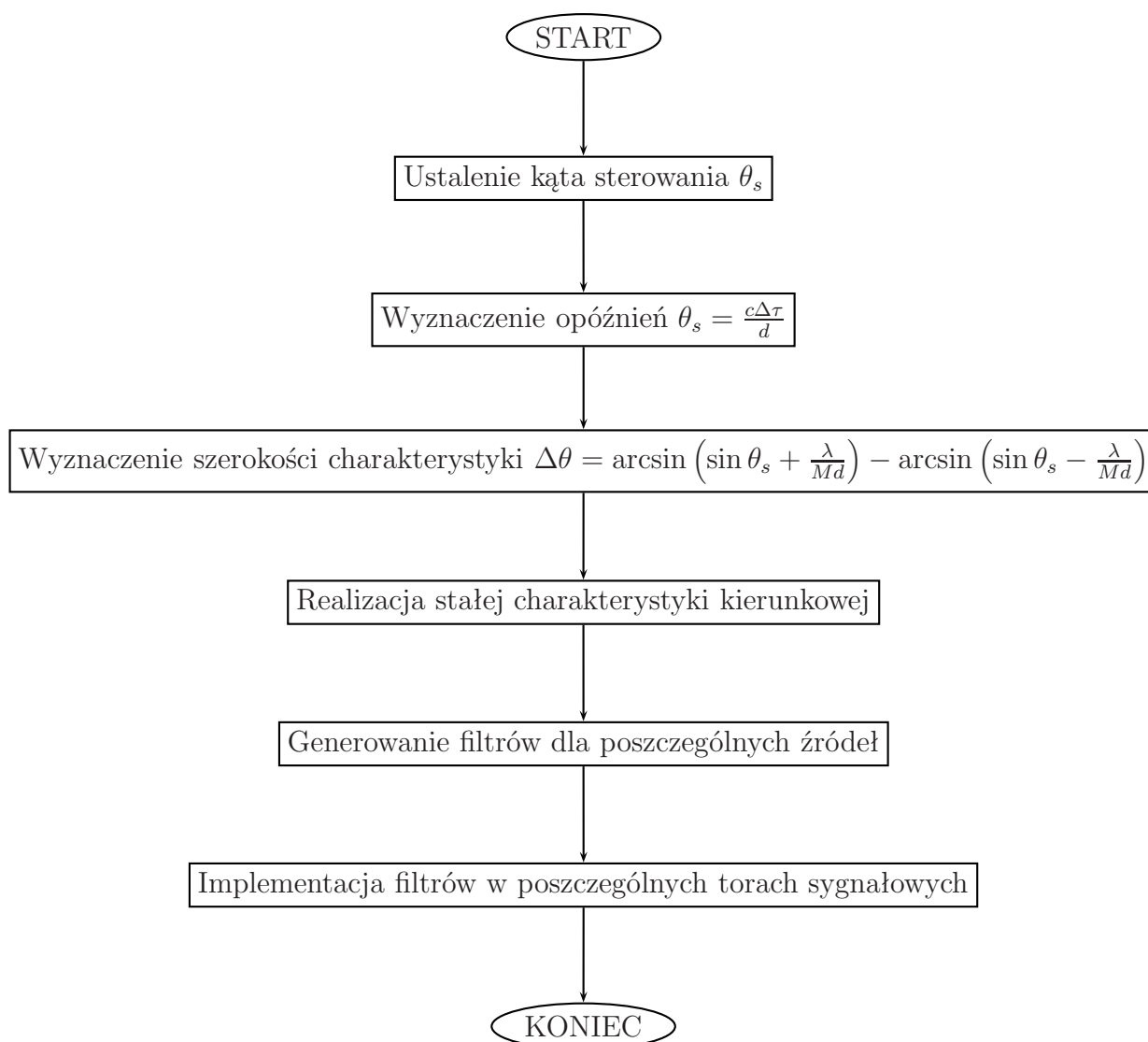
- w przypadku problemu nagłaśniania powierzchni – byłby to obszar w którym są umiejscowieni słuchacze. Zaś obszar „chroniony” byłby obszarem, w którym minimalizujemy energię akustyczną emitowaną ze źródła.
- W przypadku problemu aktywnej redukcji hałasu obszar nagłaśniany jest docelową „strefą ciszy” zaś obszar „chroniony” jest fragmentem przestrzeni w którym nie chcemy zmieniać poziomu hałasu.

Przy realizowaniu sterowania rozkładem pola akustycznego konieczne jest określenie kierunku, w jakim ma występować maksimum promieniowania źródła wielopunktowego, a następnie znalezienie takich wartości wzmocnień i opóźnień w poszczególnych kanałach by zrealizować ten wymóg. Do zrealizowania tak postawionego celu sterowania można zastosować układ sterowania przedstawiony na rysunku 5.6. Układ składa się ze źródła sygnału 1, układu cyfrowego przetwarzania sygnałów oraz samego wielopunktowego źródła dźwięku. Sygnał ze źródła zostaje rozdzielony na poszczególne kanały. Następnie w tych kanałach jest indywidualnie przetwarzany, w taki sposób by spełnić wymogi sterowania. Modyfikacja sygnałów w poszczególnych kanałach głównie polega na odpowiednim ustawieniu wzmocnienia oraz wprowadzeniu wymaganego przesunięcia fazy sygnału (opóźnieniu go) w stosunku do sygnałów w sąsiednich kanałach.



Rysunek 5.6. Schemat układu sterowania polem akustycznym; 1 – źródło sygnału, 2 – układy cyfrowego przetwarzania sygnałów, 3 – źródło wielopunktowe

Źródło wielopunktowe wykorzystywane przy sterowaniu składa się z  $M = 2N + 1$  źródeł punktowych umieszczonych wzdłuż prostej. Odległości między poszczególnymi źródłami wynoszą  $d$ . Wprowadzamy przesunięcia fazowe sygnałów generowanych przez poszczególne źródła – pomiędzy sąsiednimi źródłami przesunięcie będzie wynosiło  $\Delta\phi(\omega)$ . Przesunięcia wprowadzamy w taki sposób by skrajne źródła miały największe przesunięcia (jedno dodatnie, drugie ujemne) w stosunku do źródła elementarnego znajdującego się na środku źródła złożonego. Ponieważ (jak wykazano w poprzednim rozdziale) przesunięcia fazowe powinny być liniowe w funkcji częstotliwości najwygodniej jest zastosować opóźnienie cza-



Rysunek 5.7. Algorytm sterowania rozkładem pola akustycznego

sowe. Dla każdego źródła opóźnienie odpowiadające wymaganemu przesunięciu fazowemu przy częstotliwości  $\omega$ . Sterowanie rozkładem pola akustycznego generowanego przez źródło wielopunktowe można zrealizować zgodnie z algorytmem przedstawionym na rysunku 5.7. Wyznaczenie kąta sterowania należy zrealizować poza układem sterowania – konieczna jest ingerencja operatora. Jeżeli jest już znany ten kąt, to na tej podstawie możemy wyznaczyć konieczne opóźnienia.

Przesunięcie fazowe dla częstotliwości  $\omega$  wynosi:

$$\phi = \frac{\omega d \sin \theta_s}{c} = kd \sin \theta_s \quad (5.2)$$

powyższą zależność można zapisać przy użyciu opóźnienia  $\tau$  i wtedy wygląda ona tak:

$$\tau = \frac{d \sin \theta_s}{c} \quad (5.3)$$

Szerokość listka głównego charakterystyki kierunkowej znajdziemy poszukując miejsc zerowych tejże charakterystyki kierunkowej. Równanie określające te miejsca zerowe ma postać:

$$\sin \theta = \sin \theta_s - \frac{m\lambda}{Md} \quad (5.4)$$

gdzie:  $m$  to kolejne liczby całkowite określające rząd miejsca zerowego,  $M$  – liczba źródeł elementarnych,  $d$  – odstęp między źródłami, zaś  $\lambda$  to długość emitowanej fali. Przy określeniu szerokości listka głównego ważne są tylko miejsca zerowe dla  $m = 1$  oraz  $m = -1$  – różnica tych wartości stanowi kątową szerokość tego listka.

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\sin \theta_s + \frac{\lambda}{Md}\right) - \arcsin\left(\sin \theta_s - \frac{\lambda}{Md}\right) \quad (5.5)$$

Zależność ta jednoznacznie wskazuje, iż szerokość listka głównego charakterystyki kierunkowej zależy od długości fali, a tym samym częstotliwości oraz od parametrów konstrukcyjnych – ilości źródeł i wielkości odstępów między nimi. Konieczna jest zatem szczególna postać konstrukcyjna źródła wielopunktowego by można zrealizować sterowanie tymi parametrami. Źródło, które umożliwiałoby zmianę liczby źródeł promieniujących falę akustyczną i odległości między nimi musiałoby zawierać elementy ruchome lub znacznie większą liczbę źródeł. W ten sposób można byłoby uruchamiać (zasilać) wybrane źródła co pozwoliłoby na zmianę położenia i liczby źródeł składowych. Aby zrealizować stałą charakterystykę kierunkową można wykorzystać algorytm przedstawiony na rysunku 4.13. Wyznaczone filtry dolnoprzepustowe należy zaimplementować u układzie cyfrowego przetwarzania sygnałów.

## 6. Badania eksperymentalne

### 6.1. Eksperyment cyfrowy

Eksperyment cyfrowy zrealizowano przy pomocy metody elementów skończonych[21]. Badano rozkład pola akustycznego generowanego przez wielopunktowe źródło dźwięku. Analizowane źródło składało się z równomiernie rozmieszczonych 9 źródeł w postaci sztywnych tłoków o średnicy 0,05 m wymuszonych kinematycznie. Odległości między środkami źródeł wynosiły 0,06 m. Analizę przeprowadzono dla przypadku pola swobodnego.

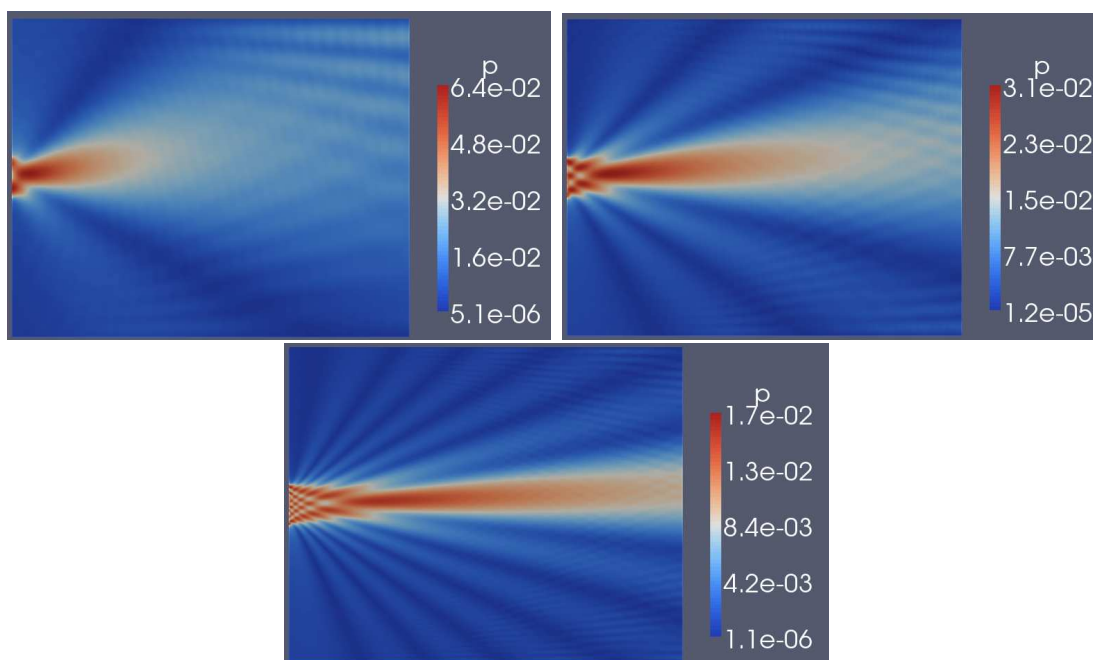
Źródło zostało umieszczone na jednej z krótszych ścian obszaru obliczeń o wymiarach 4 na 5 m. Został zbudowany płaski model obszaru. Wygenerowana siatka elementów skończonych składała się z 195178 elementów trójkątnych parabolicznych. Średni rozmiar elementu wynosił około 0,01 m, co pozwala na uzyskiwanie miarodajnych wyników do częstotliwości około 5500 Hz, obliczenia prowadzono od 100 Hz do 1000 Hz. Każdemu ze źródeł zostało przypisane opóźnienie w postaci przesunięcia fazowego. Rozchodzenie się fali akustycznej zostało opisane równaniem Helmholtza. Obliczenia wykonano w pakiecie Elmer w wersji 5.5.

Rysunek 6.1 przedstawia poglądowo rozkład amplitudy ciśnienia akustycznego dla trzech wybranych częstotliwości przy tych samych opóźnieniach zadanych dla źródeł. Widoczna jest zmiana kąta sterowania (odchylenie maksimum promieniowania od osi głównej) zależna od częstotliwości – zgodnie z oczekiwaniami.

Dla tak określonego modelu wyznaczono wartości ciśnienia akustycznego w wybranych punktach w odległości 2 m od środka źródła (patrz rysunek 6.2) o współrzędnych jak w tabelce 6.1. Środek układu współrzędnych znajduje się w geometrycznym środku źródła, oś  $x$  stanowi zaznaczona oś symetrii pomieszczenia. Wyznaczano zarówno wartość amplitudy ciśnienia akustycznego, jak i przesunięcia fazowego. Obliczenia prowadzone były dla wymuszeń źródeł zapewniających kąt sterowania (odchylenia kierunku promieniowania) równy  $20^\circ$ . Wartości ciśnienia akustycznego obliczano z krokiem w dziedzinie częstotliwości wynoszącym 1 [Hz]. Wybrane wyniki zawiera rysunek 6.3.

Widma amplitudowe różnią się między sobą. Pomimo tych różnic, widocznych w widmiach amplitudowych, obliczone na ich podstawie odpowiedzi impulsowe we wszystkich punktach są podobne i przedstawiają impuls (rysunek 6.4). Uzyskane wyniki są efektem przyjętej idealizacji: źródło w postaci tłoka, wymuszenie kinematyczne o stałej prędkości dla każdej częstotliwości, pole swobodne.

Wybrany dwuwymiarowy model pola swobodnego okazał się modelem wystarczają-

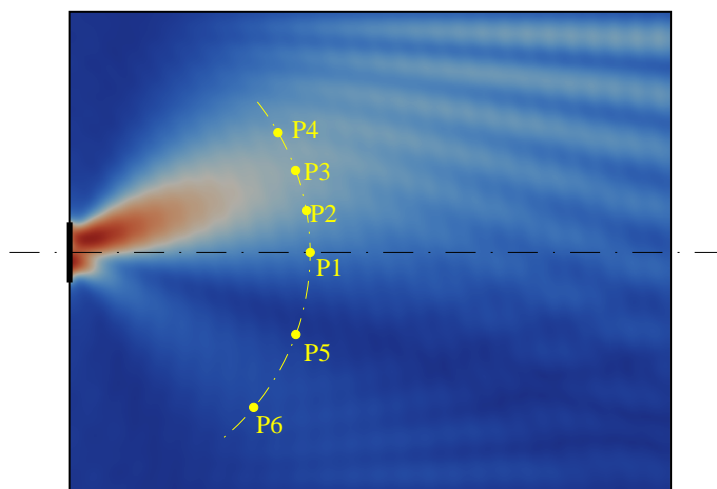


Rysunek 6.1. Rozkład amplitud ciśnienia akustycznego w przestrzeni otwartej dla częstotliwości 1000, 2000 i 3000 Hz. Przy tych samych opóźnieniach dla 9 źródeł

| Punkt pomiarowy | Wsp. $x$ | Wsp. $y$ | Kąt $\theta$ |
|-----------------|----------|----------|--------------|
| P1              | 2        | 0        | $0^\circ$    |
| P2              | 1,9696   | 0,3473   | $10^\circ$   |
| P3              | 1,87939  | 0,68404  | $20^\circ$   |
| P4              | 1,73205  | 1,000    | $30^\circ$   |
| P5              | 1,87939  | -0,68404 | $-20^\circ$  |
| P6              | 1,53209  | -1,28558 | $-40^\circ$  |

Tabela 6.1. Współrzędne punktów pomiarowych

cym do weryfikacji przeprowadzonych rozważań analitycznych. Potwierdzono prawidłowość przewidywań. Uzyskane zależności pozwalają na sterowanie charakterystyką kierunkową, a tym samym na sterowanie rozkładem pola akustycznego w wybranym obszarze. Korzystając z nich można budować źródło o sterowanych charakterystykach kierunkowych, a tym samym sterować rozkładem pola akustycznego w wybranym obszarze.



Rysunek 6.2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w eksperymencie cyfrowym

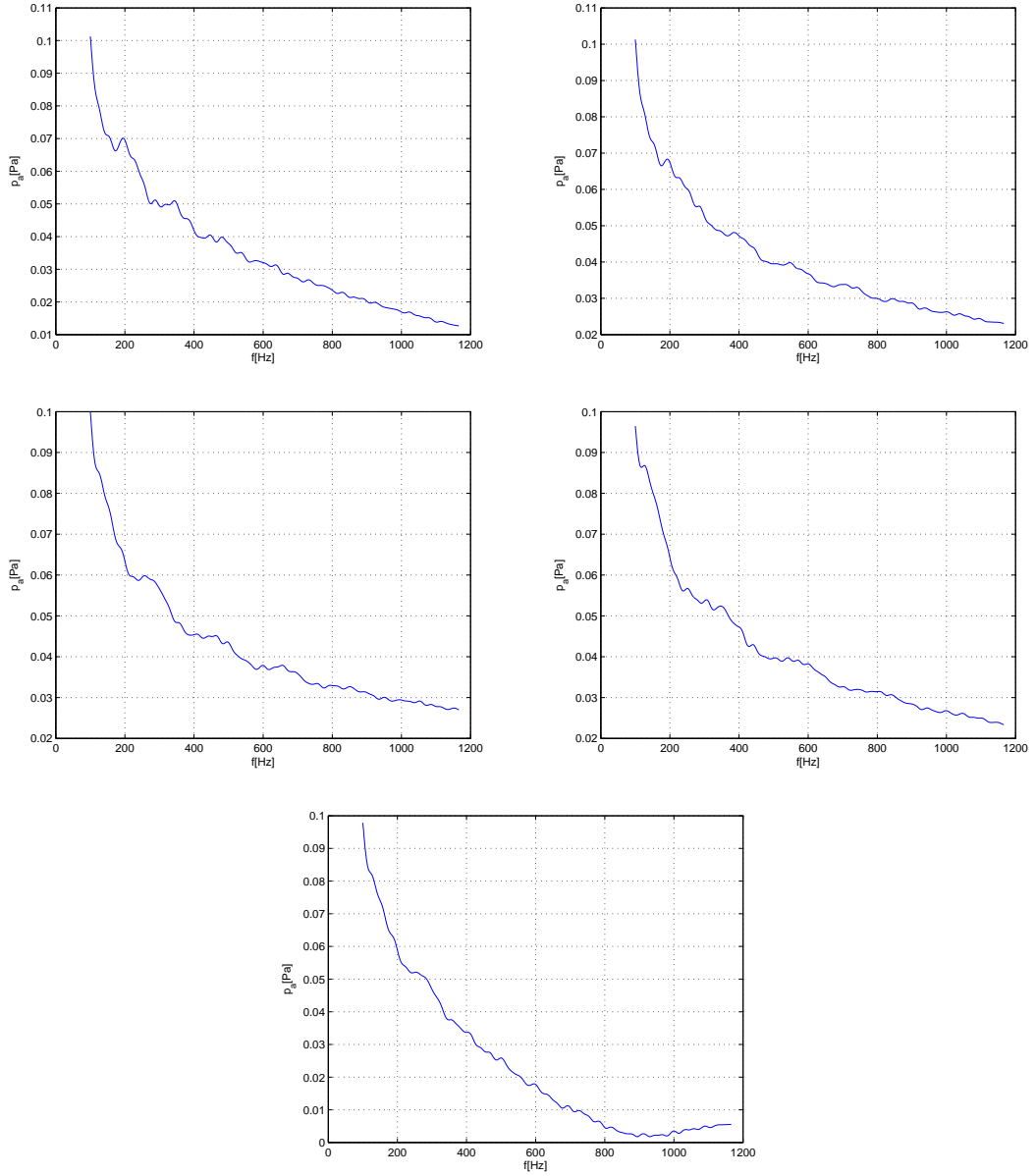
## 6.2. Wyznaczanie charakterystyk kierunkowych na drodze pomiarowej

Otrzymane wyniki teoretyczne koniecznie trzeba zweryfikować doświadczalnie. Eksperyment cyfrowy nie daje ostatecznej pewności odnośnie zachowania układu w warunkach rzeczywistych. W tym celu należy określić kształt charakterystyki kierunkowej źródła.

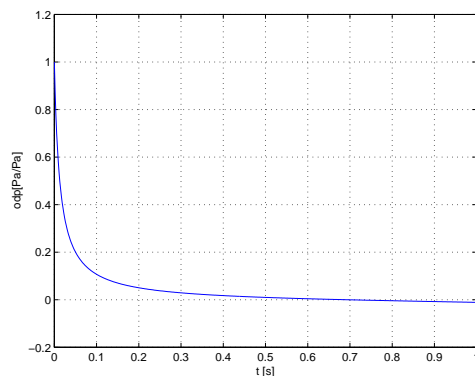
Istnieje kilka sposobów wyznaczania charakterystyk kierunkowych źródeł dźwięku. Biorąc pod uwagę samą definicję charakterystyki kierunkowej [16] można wykorzystać stolik obrotowy (np. Brüel-Kjær), na którym umieszcza się źródło. Pomiar wykonuje się w komorze bezchodowej (warunki pola swobodnego). Sam pomiar charakterystyki kierunkowej polega na zasilaniu źródła sygnałem sinusoidalnym o zadanej częstotliwości, zaś pisak sprzężony z miernikiem poziomu dźwięku rysuje charakterystykę na specjalnym papierze. Charakterystyka jest rysowana w skali logarytmicznej. Można też użyć komputera, który pozwoli na wczytywanie danych bezpośrednio do pamięci – z pominięciem pisaka i papierowego krążka. Wadą tej metody jest długotrwałość. Ile częstotliwości chcemy przeanalizować – tyle pomiarów wykonujemy.

Niewątpliwą zaletą zaś jest uzyskanie gotowych wyników, nie wymagających zbyt wielkiej obróbki oraz rozdzielczość kątowna. Oczywiście nic nie stoi na przeszkodzie, by zasilić źródło szumem pasmowym, co pozwoli uzyskiwać charakterystyki kierunkowe dla całego pasma częstotliwości. Niemniej nie można w prosty sposób wykorzystać tych wyników.

Inną metodą jest pomiar odpowiedzi impulsowej źródła w wybranych punktach na okręgu o promieniu wystarczającym, by pomiar przeprowadzany był w polu dalekim (strefa Fraunhofera). Punkty powinny być rozmieszczone na tyle gęsto, by uzyskać wymaganą rozdzielczość pomiarów [2][5]. Zasadniczą zaletą tej metody jest fakt, iż wykonujemy tylko



Rysunek 6.3. Widmo amplitudowe dla pola swobodnego w punktach P1, P2, P3, P4, P5



Rysunek 6.4. Wyznaczona odpowiedź impulsowa dla pola swobodnego w punkcie P3

tyle pomiarów, ile punktów – wynik otrzymujemy w całym badanym paśmie częstotliwości. Na podstawie zmierzonych odpowiedzi impulsowych możemy tworzyć charakterystyki kierunkowe

**Pomiar odpowiedzi impulsowej** Zależność opisującą funkcję korelacji wzajemnej między sygnałem wejściowym i wyjściowym jest podstawą korelacyjnych metod identyfikacji obiektów liniowych i można ją zapisać następująco:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)R_x(\tau - t)dt \quad (6.1)$$

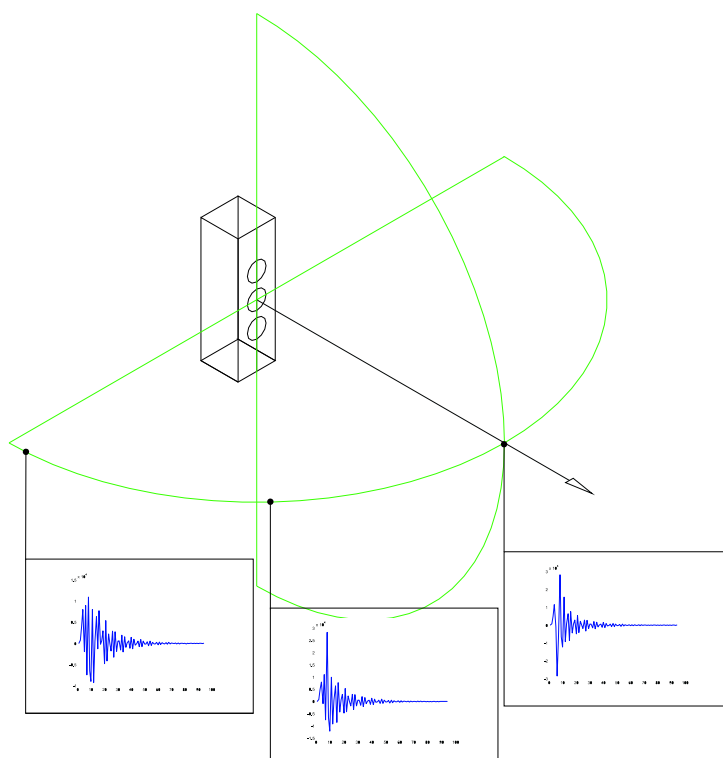
Powyższe równanie (6.1) obowiązuje dla dowolnego sygnału wejściowego dla układu liniowego. Aby rozwiązać to równanie całkowe (6.1) trzeba znać funkcje  $R_x(\tau)$  oraz  $R_{xy}(\tau)$ . Trzeba pamiętać, iż gęstość widmowa mocy funkcji  $R_x(\tau)$  musi rozciągać się na całe pasmo częstotliwości, dla którego określamy właściwości obiektu. Rozwiązanie równania (6.1) polega na zastosowaniu do niego przekształcenia Fouriera, z którego wynika:

$$S_{xy}(j\omega) = G(j\omega)S_x(\omega) \quad (6.2)$$

Jeżeli istnieje możliwość pomiaru  $S_{xy}(j\omega)$  oraz  $S_x(\omega)$  w trakcie normalnej pracy badanego układu, to przy założeniu  $S_x(\omega) \neq 0$ , z równania (6.2) obliczamy:

$$G(j\omega) = \frac{S_{xy}(j\omega)}{S_x(\omega)} \quad (6.3)$$

Najczęściej do sterującego sygnału wejściowego  $r(t)$  dodajemy dodatkowy, nieskorelowany z nim sygnał  $u(t)$ :



Rysunek 6.5. Idea wyznaczania charakterystyki kierunkowej przy pomocy odpowiedzi impulsowej

$$x(t) = r(t) + u(t) \quad (6.4)$$

Zgodnie z zasadą superpozycji, dla układów liniowych, sygnał wyjściowy jest sumą składowych:

$$y(t) = y_r(t) + y_u(t) \quad (6.5)$$

wobec tego

$$S_{yy}(j\omega) = S_{yy_r}(j\omega) + S_{yy_u}(j\omega) = S_{yy_u}(j\omega) \quad (6.6)$$

ponieważ  $S_{yy_r}(j\omega) = 0$  dla wszystkich wartości  $\omega$ . W tym przypadku równanie (6.2) można zapisać w następujący sposób:

$$S_{yy}(j\omega) = G(j\omega)S_u(\omega), \quad S_u(\omega) \neq 0 \quad (6.7)$$

Szczególnie proste jest rozwiązanie dla przypadku sygnału wejściowego  $u(t)$  w postaci szumu białego lub praktycznie realizowalnego szumu szerokopasmowego, dla którego w przybliżeniu obowiązuje zależność:

$$S_u(\omega) = 2\pi S_0 \quad (6.8)$$

oraz

$$R_u(\tau) = R_u(0)\delta(\tau) = S_0\delta(\tau) \quad (6.9)$$

Uwzględniając powyżej przytoczone zależności (6.8) oraz (6.9) otrzymamy:

$$G(j\omega) = \frac{S_{uy}(j\omega)}{S_u(\omega)} = \frac{1}{2\pi S_0} S_{uy}(j\omega) \quad (6.10)$$

Zaś w dziedzinie czasu możemy zapisać:

$$R_{xy}(\tau) = S_0 \int_{-\infty}^{\infty} h(t)\delta(\tau - t)dt = S_0 h(\tau) \quad (6.11)$$

Z zależności (6.11) wynika metoda pomiarowa: jeżeli sygnał wejściowy badanego układu będzie stanowił szum biały, to funkcja korelacji  $R_{xy}(\tau)$  odpowiada odpowiedzi impulsowej o przeskalowanych wartościach:

$$h(\tau) = \frac{1}{S_0} R_{xy}(\tau) = \text{const} \cdot R_{xy}(\tau) \quad (6.12)$$

Taka metoda pomiarowa posiada ogromną zaletę – pomiar można wykonać podczas pracy układu – ponieważ energia szumu jest rozłożona w paśmie częstotliwości i nie wpływa na warunki pracy obiektu [26]. W przeciwieństwie do innych rodzajów wymuszeń (skokowe czy impulsowe) przy wymuszeniu szumem stacjonarnym, czyli gdy funkcja autokorelacji nie ulega zmianom w czasie, czas pomiaru nie jest ograniczony.

Z uwagi na pewną trudność uzyskania białego szumu, oraz czasochłonność pomiarów przy jego pomocy, często używa się innych sygnałów testowych. Takie deterministyczne sygnały „pseudo-losowe” mogą mieć właściwości podobne do szumu losowego. Chociaż do analizy korelacyjnej liniowych systemów dynamicznych można stosować sygnały stacjonarne, stochastyczne o dowolnym rozkładzie prawdopodobieństwa wartości chwilowych, to jednak celowe okazuje się stosowanie sygnałów przyjmujących tylko dwie wartości:  $+A$  i  $-A$ . Spośród takich sygnałów najczęściej stosuje się sygnały zwane MLS (Maximum Length Sequences), które są stacjonarne i mają okres obejmujący

$$l = 2^n - 1 \quad (6.13)$$

elementów  $s_k$ , gdzie  $n$  jest liczbą całkowitą dodatnią. Główna zaleta tego sygnału polega na tym, że korelacja może być wyznaczona w efektywny sposób przez zastosowanie transformaty Hadamarda. Inna zaleta polega na łatwości implementacji generatorów tego sygnału w postaci rejestrów przesuwanych oraz łatwe uzyskiwanie długich sekwencji szumowych.

Niech  $s_k$ , dla  $k = 0, 1, \dots, l$  będzie sekwencją MLS o długości  $l$ . Dla  $n = 3$  otrzymamy:

$$-1, +1, +1, -1, +1, -1, -1 \quad (6.14)$$

Ponieważ sekwencja jest okresowa, mamy  $s_{k+1} = s_k$  oraz:

$$\sum_{k=0}^{l-1} s_k = -1 \quad (6.15)$$

Ponieważ  $s_k$  jest funkcją dyskretną, jej funkcja autokorelacji jest zdefiniowana przez zależność:

$$(\Phi_{ss})_m = \sum_{k=0}^{l-1} s_k s_{k+m} \quad (6.16)$$

i ma wartości  $l$  dla  $m = 0, l, 2l, \dots$  zaś  $-1$  dla wartości różnych od  $m$ .

Pobudzając układ sygnałami składającymi się z impulsów, następujących po sobie za odstępami  $\Delta t$ , o jednakowej mocy i znakach odpowiadających sekwencji  $s_k$  otrzymamy na wyjściu z układu sygnał będący splotem odpowiedzi impulsowej układu  $g(t)$  i sygnału wymuszającego. Po procesie próbkowania w chwilach, będących wielokrotnościami  $\Delta t$  otrzymamy:

$$s'_k = \sum_{j=0}^{l-1} s_j g_{k-j} \quad (6.17)$$

To równanie można zapisać przy pomocy macierzy  $S$ , zawierającej cykliczny układ elementów  $s_k$  oraz dodatkowy rząd i dodatkową kolumnę wypełnione jedynekami (6.18).

$$\begin{bmatrix} \bar{s} \\ s'_0 \\ s'_1 \\ s'_2 \\ \vdots \\ s'_{l-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & s_0 & s_1 & s_2 & \cdots & s_{l-1} \\ 1 & s_1 & s_2 & s_3 & \cdots & s_0 \\ 1 & s_2 & s_3 & s_4 & \cdots & s_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & s_{l-1} & s_0 & s_1 & \cdots & s_{l-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ g_l \\ g_{l-1} \\ g_{l-2} \\ \vdots \\ g_1 \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

W skrócie moglibyśmy zapisać powyższą zależność w sposób następujący:

$$s' = S \cdot g \quad (6.19)$$

W równaniu (6.18) wprowadzono oznaczenie  $\bar{s}$  jako ujemną sumę wszystkich wartości  $s'_k$  obliczoną:

$$\bar{s} = - \sum_{k=0}^{l-1} s'_k = \sum_{k=0}^{l-1} g_k \quad (6.20)$$

Z tej zależności (6.20) wynika, że

$$g = \frac{1}{l+1} S \cdot s'. \quad (6.21)$$

Równanie (6.21) stanowi rozwiązanie problemu wyznaczenia odpowiedzi impulsowej  $g(t)$  lub  $g_k$  ze zmierzonej funkcji  $s'(t)$ . Warto zauważyć, że jeżeli okres  $l$  nie jest krótki, operacja mnożenia  $S$  przez  $s'$  może być czasochłonna. Przez zamianę wierszy i kolumn macierz  $S$  można transformować w macierz Hadamarda, która zawiera  $(l+1)(l+1) = 2^{2n}$  elementów o wartościach  $+1$  oraz  $-1$  w bardzo regularnej postaci. Macierz Hadamarda można łatwo uzyskać przez prostą rekurencję:

$$\mathbb{H}_{n+1} = \begin{bmatrix} \mathbb{H}_n & \mathbb{H}_n \\ \mathbb{H}_n & -\mathbb{H}_n \end{bmatrix}, \text{ z } \mathbb{H}_0 = 1 \quad (6.22)$$

Przedstawiona metoda jest zaimplementowana w dedykowanych przyrządach pomiarowych i w specjalizowanym oprogramowaniu. Do generowania sekwencji MLS oraz do pomiaru odpowiedzi impulsowych źródeł wielopunktowych wykorzystano oprogramowanie Sample Champion.

### 6.3. Eksperymentalna weryfikacja modelu obliczeniowego

W celu weryfikacji hipotezy, iż model obliczeniowy przedstawiony w poprzednich rozdziałach jest prawidłowy dokonano pomiarów charakterystyk kierunkowych wybranego układu.

Pomiary odpowiedzi impulsowych wielopunktowego źródła dźwięku zostały wykonane w komorze bezdechowej Katedry Mechaniki i Wibroakustyki Akademii Górniczo–Hutniczej. Do generowania sekwencji MLS, a następnie wyznaczania odpowiedzi impulsowej na podstawie pomiarów wykorzystano program Sample Champion.

Źródło składało się z 32 głośników rozmieszczonych w 8 grupach po 4 głośniki. Odległości między środkami głośników wynosiły 54,5 mm w grupach 1 i 2, 70 mm w następnych 6 grupach. Odległości między grupami wynosiły odpowiednio: 54,5, 70, 120, 140, 160, 220 mm. Podczas pomiarów zasilano 7 grup głośników. Skrajne grupy Zastosowane głośniki to Visaton FRS 5, przedstawione na rysunku 6.6. Poniżej przedstawiono dane producenta dotyczące zastosowanych głośników.

|                                      |                    |
|--------------------------------------|--------------------|
| Moc znamionowa                       | 5 W                |
| Moc maksymalna                       | 8 W                |
| Impedancja znamionowa Z              | 8 Ohm              |
| Pasma przenoszenia                   | 150–20000 Hz       |
| Średni poziom ciśnienia akustycznego | 84 dB (1 W/1 m)    |
| Maksymalne przemieszczenie membrany  | 4 mm               |
| Częstotliwość rezonansowa $f_s$      | 270 Hz             |
| Indukcja magnetyczna                 | 0,95 T             |
| Strumień magnetyczny                 | 105 $\mu$ Wb       |
| Masa netto                           | 0,126 kg           |
| Oporność dla prądu stałego $R_{dc}$  | 7,2 Ohm            |
| Współczynnik Q mechaniczny $Q_{ms}$  | 3,19               |
| Współczynnik Q elektryczny $Q_{es}$  | 1,81               |
| Całkowity współczynnik $Q_{ts}$      | 1,15               |
| Objętość równoważna $V_{as}$         | 0,2 l              |
| Efektywna powierzchnia tłoka $S_d$   | 12 cm <sup>2</sup> |
| Masa ruchoma $M_{ms}$                | 0,5 g              |
| Współczynnik siły $B_{xl}$           | 1,6 T m            |

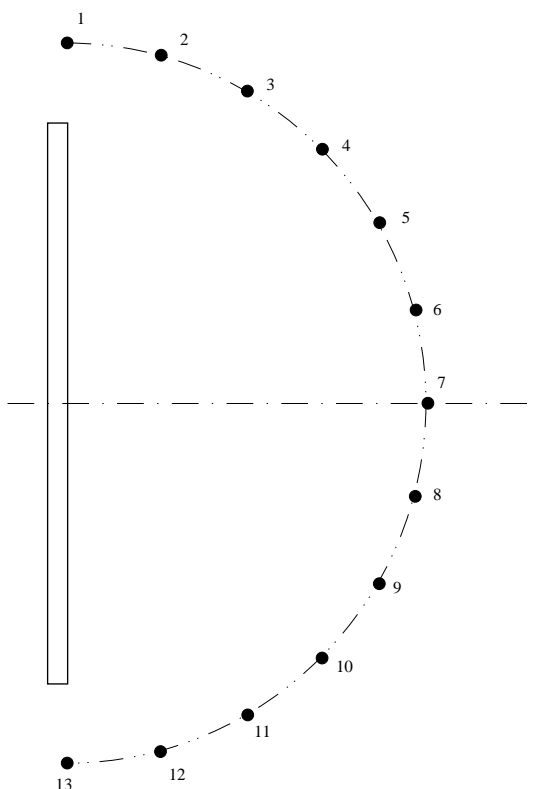


Rysunek 6.6. Widok głośnika Visaton FRS 5

**Procedura pomiarowa** Procedura pomiarowa składała się z następujących faz:

1. umieszczenie źródła we właściwym miejscu
2. umieszczenie mikrofonu ze statywem w pierwszym punkcie pomiarowym w taki sposób, by oś mikrofonu była równoległa do prostej łączącej środek źródła i punkt pomiarowy
3. wykonanie 3 pomiarów odpowiedzi impulsowej
4. przestawienie statywu i mikrofonu do następnego punktu pomiarowego
5. powtarzano punkty 3 i 4 dla wszystkich pozostałych punktów pomiarowych

Pomiary odpowiedzi impulsowych zostały wykonane w 13 punktach pomiarowych leżących na okręgu o promieniu 3,4 m. Środek okręgu pokrywał się ze środkiem geometrycznym badanego źródła. Punkty pomiarowe rozmieszczono równomiernie co  $15^\circ$  jak na rysunku 6.7. Parametry ustawione w oprogramowaniu SampleChampion w trakcie badań: częstotliwość próbkowania –  $f_s = 48000$  [Hz], długość próbki – 16 bit, 1 kanał pomiarowy.

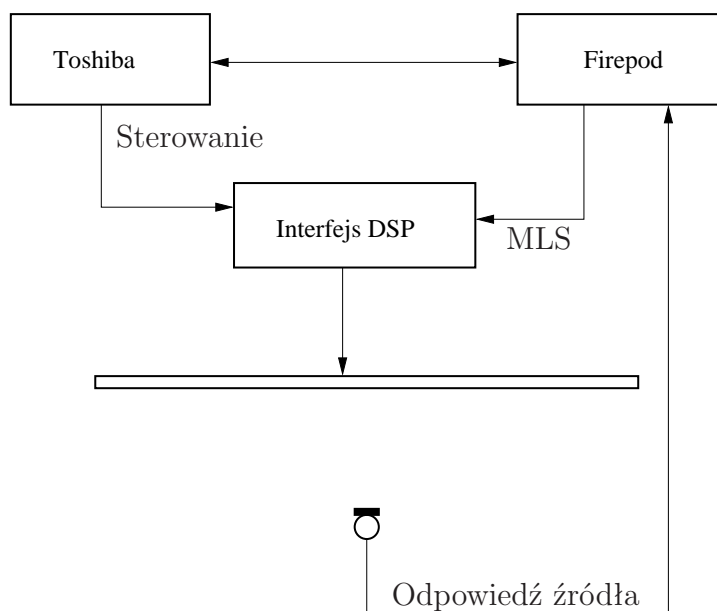


Rysunek 6.7. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych wokół źródła

**Tor pomiarowy** składał się z następujących elementów (rysunek 6.8

- programowego generatora sekwencji LMS (Sample Champion) działającego na laptopie Toshiba

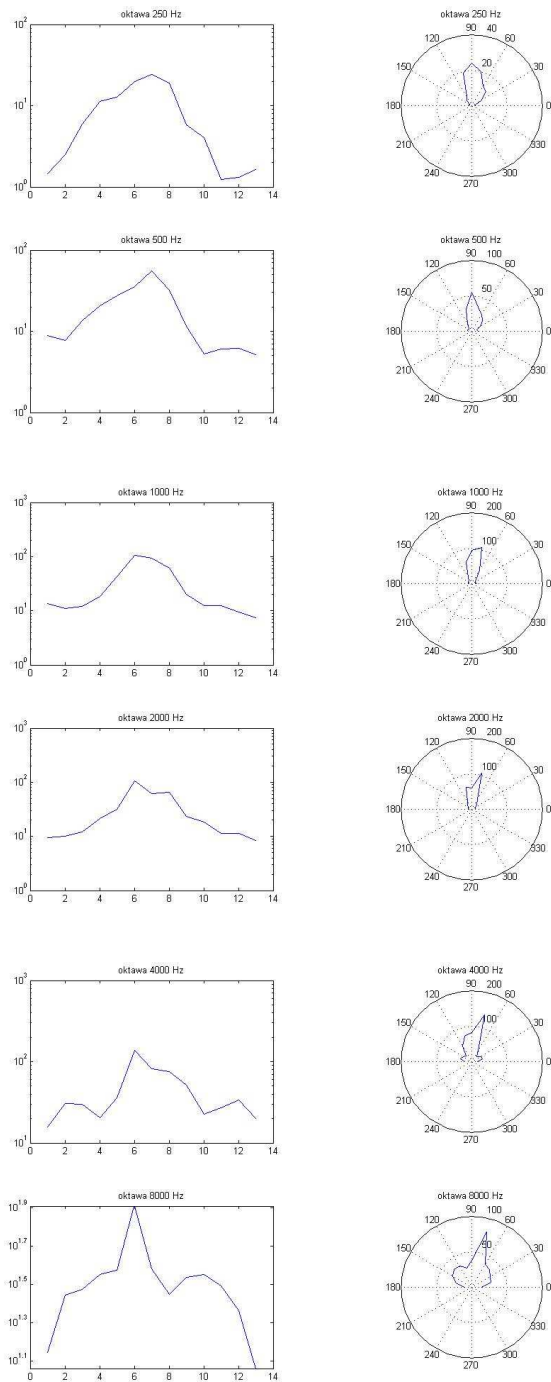
- zewnętrznej karty dźwiękowej PreSonus Firepod 24BIT/96K realizującej równoczesne nadawanie sygnału do układu DSP oraz odbieranie sygnału docierającego do mikrofonu pomiarowego
- układu DSP realizującego przetwarzanie sygnału emitowanego przez poszczególne źródła kolumny
- wielopunktowego źródła dźwięku
- mikrofonu pomiarowego ECM 8000 firmy Behringer



Rysunek 6.8. Schemat toru pomiarowego do pomiaru odpowiedzi impulsowych źródła

Wyniki pomiarów przedstawiono na poniższych rysunkach. Przedstawiono charakterystyki kierunkowe w układach współrzędnych prostokątnym w skali logarytmicznej na osi wartości ciśnienia i biegunowym w skali liniowej. Rysunek 6.9 przedstawia wyniki pomiarów, gdy nie wprowadzono opóźnień w poszczególne kanały. Widoczne są na rysunku duże zniekształcenia charakterystyki kierunkowej. Wynikają one głównie z przyjętej lokalizacji punktów pomiarowych. Punkty rozmieszczono co 15 stopni i w związku z tym trudne jest dokładne określenie charakterystyki kierunkowej źródła. Ze względu na fakt obrazowania charakterystyki kierunkowej dla pasm oktaowych duża odległość kątowa punktów pomiarowych nie stanowi przeszkody. Efekty sumowania charakterystyk dla poszczególnych częstotliwości w oktawie powodują minimalizowanie listków bocznych.

Rysunek 6.11 przedstawia wyniki dla układu z wprowadzonymi zmianami fazy sygnałów transmitowanych przez poszczególne źródła. Przesunięcia fazowe są realizowane przy pomocy wprowadzania opóźnień w poszczególnych kanałach. Opóźnienia są definiowane dla poszczególnych zgodnie z tabelą 6.2.

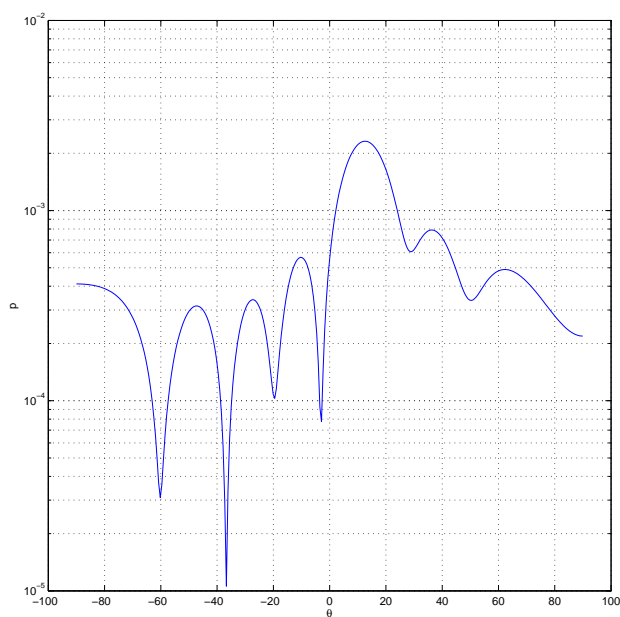


Rysunek 6.9. Zmierzone charakterystyki kierunkowe dla układu bez opóźnień

| Grupa   | Opóźnienie |
|---------|------------|
| Grupa 1 | 0 ms       |
| Grupa 2 | 0.1 ms     |
| Grupa 3 | 0.2 ms     |
| Grupa 4 | 0.3 ms     |
| Grupa 5 | 0.4 ms     |
| Grupa 6 | 0.5 ms     |
| Grupa 7 | 0.6 ms     |

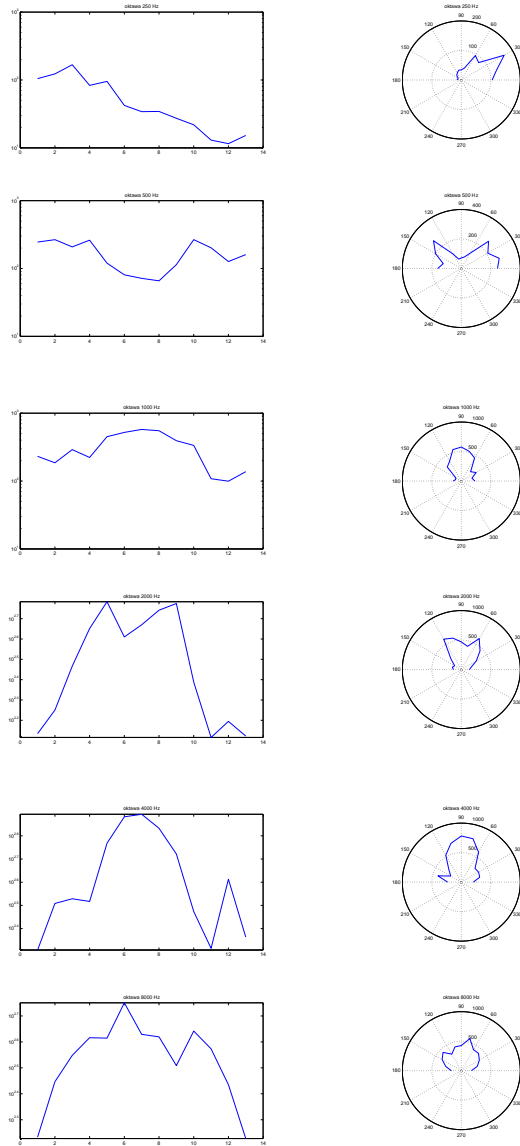
Tabela 6.2. Wartości opóźnień ustawianych dla poszczególnych grup głośników

Dla tak ustawionych opóźnień charakterystyka kierunkowa powinna ulec odchyleniu o około  $12^\circ$ . Przykładową charakterystykę kierunkową przedstawiono na rysunku 6.10. Najistotniejszym elementem rysunku jest maksimum widoczne w okolicach 12 stopni.



Rysunek 6.10. Przykładowa teoretyczna charakterystyka kierunkowa dla  $f=500$  [Hz]

Na przedstawionych rysunkach jest widoczne odchylenie charakterystyki kierunkowej zgodne z teoretycznymi oczekiwaniami. Problem stanowi gęstość siatki pomiarowej – przy punktach pomiarowych co  $15^\circ$  nie w każdym przypadku udało się uzyskać dobrze widoczne maksimum. Porównanie wyników bez opóźnień i z wprowadzonymi opóźnieniami



Rysunek 6.11. Zmierzone charakterystyki kierunkowe dla układu z opóźnieniami

pozwała na oszacowanie położenia maksimum. Podobnie szerokość pasma pomiarowego stanowi pewne utrudnienie w analizie wyników pomiarów. Rysunki na podstawie zależności teoretycznych wykonywane były dla pojedynczych częstotliwości, podczas gdy wyniki pomiarów przedstawione są dla oktawowego pasma częstotliwości. Niemniej widoczne jest odchylenie charakterystyk kierunkowych zgodne z oczekiwaniami. Tym samym eksperyment wykazał iż cel pracy został osiągnięty.

## 7. Podsumowanie

### 7.1. Podsumowanie i wnioski

Praca porusza temat sterowania rozkładem pola akustycznego generowanego przez wielopunktowe źródła dźwięku. Potwierdzono, iż jest możliwe sterowanie rozkładem pola akustycznego na drodze dynamicznej modyfikacji charakterystyk kierunkowych źródła wielopunktowego, rozumianego jako liniowy układ źródeł składowych.

Praca ma charakter analityczno-doświadczalny. W części analitycznej sformułowano opis źródła i wyprowadzono zależności pozwalające na uzyskanie sterowania charakterystyką kierunkową źródła dźwięku. Część doświadczalna dotyczy weryfikacji uzyskanych wyników na drodze eksperymentalnej.

Celem pracy jest opracowanie metodyki sterowania charakterystyką kierunkową źródła, a tym samym sterowania rozkładem pola akustycznego generowanego przez wielopunktowe źródła dźwięku. Zrealizowanie tak postawionego celu wymagało oryginalnego rozwiązania szeregu problemów takich jak:

- opracowanie ogólnych zależności pozwalających na budowanie źródeł o sterowanych charakterystykach kierunkowych do sterowania rozkładem pola akustycznego
- opracowanie algorytmu sterowania charakterystyką kierunkową źródła dźwięku

Aby rozwiązać te problemy dokonano oryginalnej syntezy istniejącego stanu wiedzy na temat sterowania rozkładem pola akustycznego generowanego przez źródła wielopunktowe.

Sterowanie rozkładem pola akustycznego zostało zrealizowane na drodze modyfikacji sygnału docierającego do poszczególnych źródeł składowych. Modyfikacje polegają na wprowadzaniu przesunień fazowych indywidualnie dla każdego źródła, dzięki czemu osiąga się efekt pozornej zmiany geometrii samego źródła. Zmiana geometrii może oznaczać efekt pozornego obrotu źródła o kąt i/lub wygięcia samego źródła wielopunktowego, co powoduje modyfikację charakterystyki kierunkowej, a to skutkuje zmianą rozkładu pola akustycznego w przestrzeni otaczającej źródło.

Oprócz zmiany geometrii źródła, w pracy opisano sposób uzyskiwania stałej charakterystyki kierunkowej źródeł wielopunktowych dla pewnego (szerokiego) zakresu częstotliwości. Wykorzystując wyprowadzone zależności sformułowano algorytm pozwalający na sterowanie kierunkiem maksymalnego promieniowania źródła.

W pracy dokonano wyprowadzeń analitycznych, co w obecnej dobie fascynacji technikami komputerowymi jest jakby niemożliwe, a następnie wyniki syntezy analitycznej zweryfikowano metodami symulacyjnymi z wykorzystaniem nowoczesnych pakietów do obliczeń numerycznych, jak również zweryfikowano eksperymentalnie z wykorzystaniem zaawansowanych i unikalnych technik pomiarowych.

Praca może znaleźć zastosowanie w budowie systemu nagłośnienia, pozwalającego na wybiórcze nadawanie audycji do wybranych obszarów. Jest to szczególnie istotne np. w muzeach, gdzie przy poszczególnych elementach ekspozycji można odtwarzać omówienia eksponatów. Także tam, gdzie jest niezbędne nadawanie komunikatu w różne obszary przestrzeni, przy braku możliwości przemieszczania samego źródła. Wydaje się zasadna próba zastosowania omawianej pracy w dziedzinie redukcji hałasu, szczególnie w aktywnej jego redukcji.

Przedstawione rozwiązania posiadają swoje ograniczenia – głównie pasma częstotliwości, dla którego można uzyskiwać sterowanie dźwiękiem. Dla dyskretnych źródeł występują ograniczenia w postaci wielkości pojedynczego elementu drgającego oraz wielkości całego źródła wielopunktowego – te ograniczenia decydują o możliwościach sterowania dźwiękiem.

Jako dalsze kierunki badań wskazać należy sprawdzenie zmian zrozumiałości mowy nadawanej przez te źródła oraz ewentualnego zastosowania do dźwiękowych systemów ostrzegawczych. System oparty o takie źródła mógłby „omiatać” obszar zagrożony komunikatem, zapewniając tym samym lokalny wzrost wskaźnika zrozumiałości mowy. Niezwykle istotne jest zbudowanie nowych źródeł dźwięku posiadających mniejsze wymiary. Umożliwi to dalszy postęp w sterowaniu rozkładem pola akustycznego.

## Bibliografia

- [1] R. M. Aarts, A. J. E. M. Janssen. On analytic design of loudspeaker arrays with uniform radiation characteristics. *JASA*, 107(1):287–292, 2000.
- [2] J. A. S. Angus, M. J. Evans. Loudspeaker polar pattern measurement and representation with surface spherical harmonics. *104 Audio Engineering Society Convention*, Amsterdam 1998, Maj 1998.
- [3] M. Antila, J. Kataja, B. Välimäki. Sound directivity control using striped panel loudspeaker. *110th Convention of AES*, 2001 May 12-15 Amsterdam, The Netherlands, Maj 2001. Audio Engineering Society, Audio Engineering Society.
- [4] J. Assaad, J.M. Rouvaen. Numerical evaluation of the far-field directivity pattern using the fast fourier transform. *JASA*, (104):72–80, Lipiec 1998.
- [5] J. E. Baird, P. S. Meyer. The analysis, interaction, and measurement of loudspeaker far—field polar patterns. *106th Audio Engineering Society Convention*, Munich, Maj 1999.
- [6] B. Berdugo, M. A. Doron, J. Rosenhouse, H. Azhari. On direction finding of an emitting source from time delays. *JASA*, (6):3355–3363, 1999.
- [7] A. Brański. Wielelementowe modele różnych stopni źródła dźwięku. *Materiały konferencyjne XLIV OSA*, strony 183–188, Gdańsk – Jastrzębia Góra, Wrzesień 1997. PTA Oddział Gdański.
- [8] R.D. Ciskowski, C.A. Brebbia. *Boundary Element Methods in Acoustics*. Computational Mechanics Publications Southampton Boston, 1991.
- [9] I. Czajka. Źródło dźwięku o zmiennej charakterystyce kierunkowej. *V Szkoła Metody Aktywne Redukcji Drgań i Hałasu*, Kraków-Krynica, Maj 2001. AGH, PK, PAN, WIMiR, AGH.
- [10] I. Czajka. Koncepcja źródła dźwięku o sterowanej charakterystyce kierunkowej. *WibroTech 2005 - XI konferencja naukowa wibroakustyki i wibrotechniki, VI ogólnopolskie seminarium Wibroakustyka w systemach technicznych*, strona 94, Warszawa, Listopad 2005. Politechnika Warszawska. Instytut Podstaw Budowy Maszyn, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie. Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, Politechnika Warszawska.
- [11] I. Czajka. Analityczny model wielopunktowego źródła dźwięku. *XII konferencja naukowa wibroakustyki i wibrotechniki, VII ogólnopolskie seminarium Wibroakustyka w systemach technicznych WIBROTECH 2006*, strona 60, Kraków, Wrzesień 2006. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie. Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, Politechnika Warszawska. Instytut Podstaw Budowy Maszyn, AGH, Katedra Mechaniki i Wibroakustyki.
- [12] I. Czajka, R. Olszewski, H. Łopacz. Zagadnienie modelowania rzeczywistych źródeł dźwięku metodami numerycznymi. *Materiały XXVIII Zimowej Szkoły Zwalczenia Zagrożeń Wibro-*

- akustycznych*, Gliwice - Wisła, Luty 2000. Instytut Fizyki Politechniki Śląskiej, Polskie Towarzystwo Akustyczne - Oddział Górnośląski.
- [13] I. Czajka, H. Łopacz, R. Olszewski. Modelowanie przestrzennej odpowiedzi impulsowej głośnika. *XLVII Otwarte Seminarium z Akustyki OSA '2000*, strony 555–558, Rzeszów–Jawor, Wrzesień 2000. Komitet Akustyki Polskiej Akademii Nauk ; Polskie Towarzystwo Akustyczne. Oddział Rzeszowski ; Instytut Fizyki, Instytut Techniki Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Rzeszowie, Polskie Towarzystwo Akustyczne. Oddział Rzeszowski.
- [14] A. Czyżewski. *Dźwięk cyfrowy. Wybrane zagadnienia teoretyczne, technologia, zastosowania*. Akad. Oficyna Wydawn. EXIT, Warszawa, 1998.
- [15] W. F. Druyvesteyn, J. Garas. Personal sound. *J. Audio Eng. Soc.*, 45(9):685–701, Wrzesień 1997.
- [16] Z. Engel. *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1993.
- [17] F. Fahy. *Foundations of Engineering Acoustics*. Academic Press San Diego, 2000.
- [18] W. G. Gardner. *3-D Audio Using Loudspeakers*. Praca doktorska, Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [19] M. M. Goodwin, G. W. Elko. Beam dithering. *Proc. Audio Engineering Society*, strony 169–172. Audio Engineering Society, AES, Październik 1992.
- [20] M. M. Goodwin, G. W. Elko. Constant beamwidth beamforming. *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, and Signal Processing*, strony 169–172, Minneapolis, Kwiecień 1993. AT&T Bell Laboratories, IEEE.
- [21] A. Gołaś. *Metody komputerowe w akustyce wnętrza i środowiska*. Wyd. AGH, 1995.
- [22] A. Gołaś, redaktor. *Podstawy sterowania dźwiękiem w pomieszczeniach*. Wyd. AGH, 2000.
- [23] A. Gołaś, W. Ciesielka, R. Olszewski, I. Czajka. An active system for noise control using digital filtering. *INTERNOISE : the 2005 international congress and exposition on Noise control engineering*, strona 64, Rio de Janeiro, Brazil, Sierpień 2005. The International Institute of Noise Control Engineering (I-INCE), SOBRAC.
- [24] A. Gołaś, I. Czajka. Koncepcja źródła dźwięku o sterowanej charakterystyce kierunkowej. *XLVI Otwarte Seminarium z Akustyki OSA '99*, strona 392, Kraków–Zakopane, Wrzesień 1999. Polskie Towarzystwo Akustyczne. Oddział Krakowski, Polskie Towarzystwo Akustyczne. Oddział Krakowski.
- [25] A. Gołaś, R. Olszewski, I. Czajka. Modelowanie promieniowania źródeł dźwięku w przestrzeni ograniczonej. *WibroTech 2003: X konferencja naukowa wibroakustyki i wibrotechniki: V ogólnopolskie seminarium Wibroakustyka w systemach technicznych*, strona 73, Kraków, Listopad 2003. Politechnika Warszawska. Instytut Podstaw Budowy Maszyn, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie. Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, Akademia Górniczo-Hutnicza.
- [26] R. Hagel, J. Szuta. *Podstawy miernictwa wielkości stochastycznych, wolumen 1187 serii Skrypty Uczelniane*. Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1985.
- [27] J. A. Harrel. Constant-beamwidth one-octave bandwidth end-fire line array of loudspeakers. *JASA*, (43):581–591, Lipiec 1995.
- [28] E. Hixson, K. Au. Broadband constant beamwidth acoustical arrays. *Technical Report, Acoustics Research Lab, U.T.Austin*, (19), 1970.

- [29] E. Hojan. *Zasady nagłaśniania pomieszczeń i przestrzeni otwartej*. Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań, 2003.
- [30] T. Uhl J. Giergiel. *Identyfikacja układów mechanicznych*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1990.
- [31] D.H. Johnson, D.E. Dudgeon. *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993.
- [32] A. Karafiat. *Analiza metody elementów brzegowych w zadaniu rozpraszania fali akustycznej*. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1996.
- [33] G. Lalement. *Modyfikacja własności dynamicznych układów mechanicznych*. Ossolineum, 1974.
- [34] P. Malcharek, H. Łopacz, W. Ciesielka. Badania parametrów akustycznych auli agh. *Materiały XXVII Zimowej Szkoły Zwalczenia Zagrożeń Wibroakustycznych, Gliwice–Ustroń, 22. 02–27. 02. 1999*, (180):111–118, 1999.
- [35] I. Malecki. *Teoria fal i układów akustycznych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1964.
- [36] Numerical Integration Technologies. *Raynoise Rev. 2.1 manual*.
- [37] R. Olszewski. *Zastosowanie metody elementów skończonych i brzegowych do analizy pola akustycznego*. Praca doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie. Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki. Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, Akademia Górniczo-Hutnicza Kraków, 2005.
- [38] R. L. Pritchard. Optimum directivity patterns for linear point arrays. *JASA*, (25):879–891, 1953.
- [39] P. Pruchnicki. Zastosowanie metody narmax do modelowania głośników dynamicznych. *Materiały konferencyjne XLIV OSA*, strony 547–552, Gdańsk – Jastrzębia Góra, Wrzesień 1997. PTA Oddział Gdański.
- [40] R. Smith. Constant beamwidth receiving arrays for broad band sonar systems. *Acoustica*, (23):21–26, 1970.
- [41] E. Stein, L. Wendland. *Finite Element and Boundary Element Techniques from Mathematical and Engineering Point of View*. Springer–Verlag, Wien–New York, 1988.
- [42] D. Tucker. Arrays with constant beam-width over a wide frequency range. *Nature*, (180):496–497, 1957.
- [43] M. Van Der Wal, E. W. Start, D. De Vries. Design of logarithmically spaced constant-directivity transducer arrays. *JASA*, 44(6):497–507, Czerwiec 1996.
- [44] D. B. Ward, R. A. Kennedy, R. C. Williamson. Theory and design of broadband sensor arrays with frequency invariant far-field beam patterns. *JASA*, (97):1023–1034, Luty 1995.
- [45] J. Van Der Werff. Electronically controlled loudspeaker arrays without side lobes. *110th Convention of AES*, 2001 May 12-15 Amsterdam, The Netherlands, Maj 2001. Audio Engineering Society, Audio Engineering Society.
- [46] S.-C. Wooh, Y. Shi. Optimum beam steering of linear phased arrays. *Wave Motion*, (29):245–265, 1999.
- [47] R. Wyrzykowski. *Liniowa teoria pola akustycznego osrodków gazowych*. Rzeszowskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk, Wyższa Szkoła Pedagogiczna, 1972.

- [48] R. Wyrzykowski. *Kierunkowość płaskich harmoniczných źródeł fal akustycznych w odgro-dzie i zagadnienia z tym związane*. Wydawnictwo Oświatowe FOSZE, Rzeszów, 1993.
- [49] R. Wyrzykowski, redaktor. *Wybrane zagadnienia z teorii pola akustycznego*. Wydawnictwo Oświatowe FOSZE, Rzeszów, 1994.
- [50] Z. Żyszkowski. *Podstawy elektroakustyki*. WNT, Warszawa, wydanie wyd. 3 unowocześnioné i uzupełnione, 1984.