



Politechnika Wrocławska

DZIEDZINA: nauk inżynieryjno-technicznych

DYSCYPLINA: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

ROZPRAWA DOKTORSKA

Kształtowanie frontu fali za pomocą soczewek akustycznych

Mgr inż. Tomasz Nowak

Promotor:

prof. dr hab. inż. Andrzej Dobrucki

Słowa kluczowe: soczewka akustyczna, przetworniki elektroakustyczne, fala akustyczna, FEM, stała kierunkowość, pole bliskie, szerokość wiązki

WROCŁAW 2024

Podziękowania

Dziękuję przede wszystkim mojemu mentorowi od ponad dekady, profesorowi Andrzejowi Dobruckiemu, za opiekę nad moją edukacją, nakłanianie mnie do pisania prac i brania udziału w konferencjach, za cierpliwość i wytrwałość w roli promotora: od pracy inżynierskiej, przez pracę magisterską aż po doktorat. Dziękuję również za samo nakłanianie do zapisania się na studia doktoranckie, bez determinacji Profesora ta rozprawa nie miałaby szans powstać.

W następnej kolejności dziękuję wszystkim pracownikom Katedry Akustyki i Multimediów Politechniki Wrocławskiej, za niejednokrotną pomoc, radę czy przekazanie wiedzy.

Dziękuję również Aleksandrze Klimek, z którą jako jedyni doktoranci na roku przeszliśmy drogę do złożenia prac, wspierając się i pomagając sobie przez lata.

Na wdzięczność zasługują wszyscy ludzie wspierający po drodze: rodzina, znajomi oraz nieznajomi spotykani przez ostatnie lata.

Streszczenie

Rozprawa doktorska przedstawia prowadzone badania nad soczewką umożliwiającą kontrolę kształtu czoła fali akustycznej dla dowolnego źródła. Rozwiązanie techniczne zostało opisane pod kątem innowacyjności względem podobnych pomysłów obecnych w literaturze. Zaprezentowano model geometryczny opisujący zasadę działania, przeprowadzono symulacje działania metodami numerycznymi oraz wykonano pomiary w części eksperymentalnej. Przeprowadzono dodatkowe obliczenia i pomiary ograniczające uzyskane wyniki na pole bliskie oraz pole dalekie.

Dysertacja opiera się o zaprojektowaną przykładową soczewkę dla konkretnego przetwornika izodynamicznego, który cechuje w przybliżeniu jednorodny rozkład prędkości na całej powierzchni membrany, czyniąc go źródłem płaskiej fali akustycznej. Zadaniem soczewki było nadanie płaskiemu czołu fali określone krzywizny poprzez podział na jednostkowe kanały różnej długości, osiągając określony rozkład opóźnień w komórkach macierzy wyjściowej. Soczewka w modelu numerycznym była odwzorowana w rzeczywistości za pomocą druku 3d z dużą dokładnością.

Teza pracy zakłada możliwość kształtowania czoła fali w dwóch płaszczyznach pracy soczewki, 'pionowej' i 'poziomej'. Symulacje oraz pomiary wykazały możliwość niezależnego wpływu na jedną i drugą. Dla pola bliskiego, w większości przypadków wyniki eksperymentalne były zgodne z modelami numerycznymi, w rozprawie przedstawiono hipotezy dotyczące powodów rozbieżności dla części wyników.

Wizualizacja rozkładu ciśnienia w polu akustycznym w części symulacyjnej weryfikuje tezę bezpośrednio. Wyniki pomiarów w polu dalekim części eksperymentalnej potwierdzają ją pośrednio, poprzez charakteryzację źródła pod względem kierunkowości w funkcji częstotliwości, porównując przetwornik bez soczewki z przetwornikiem wyposażonym w soczewkę. Uzyskane wyniki nie są możliwe bez osiągnięcia zakrzywionego czoła fali akustycznej, przetwornik z soczewką funkcjonuje w zbliżony sposób do źródła w postaci wycinka pulsującej elipsoidy.

Abstract

The doctoral dissertation presents the ongoing research on a lens that allows to control the shape of the acoustic wave front for any source. The technical solution has been described in terms of innovation in relation to similar ideas present in the literature. A geometric model describing the principle of operation was presented, numerical simulations were carried out and measurements were made in the experimental part. Additional calculations and measurements were carried out to distinguish the results into the near and far fields.

The dissertation is based on a designed sample lens for a specific isodynamic transducer, which is characterized by an approximately homogeneous velocity distribution over the entire surface of the diaphragm, making it a source of a flat acoustic wave. The task of the lens was to give the flat wavefront a specific curvature by dividing it into unit channels of different lengths, achieving a specific distribution of delays in the cells of the output matrix. The lens in the numerical model was reproduced in reality using 3D printing with high accuracy.

The thesis assumes the possibility of shaping the wavefront in two planes of the lens, 'vertical' and 'horizontal'. Simulations and measurements showed the possibility of independent influence on both. For the near field, in most cases the experimental results were consistent with numerical models, and the dissertation presents hypotheses about the reasons for discrepancies for some of the results.

Visualization of the pressure distribution in the acoustic field in the simulation part verifies the thesis directly. The results of measurements in the far field of the experimental part confirm it indirectly, by characterizing the source in terms of directivity as a function of frequency, comparing a transducer without a lens with a transducer equipped with a lens. The results obtained are not possible without achieving a curved acoustic wave front, the transducer with a lens functions in a similar way to the source in the form of a section of a pulsating ellipsoid.

Wykazy

Wykaz akronimów

AMT	„Air Motion Transformer”, typ przetwornika elektroakustycznego, gdzie membrana porusza się prostopadle do kierunku promieniowania;
BEM	„Boundary Element Method”, metoda elementów brzegowych w obliczeniach numerycznych;
CAD	„Computer Aided Design”, oprogramowanie do modelowania przestrzennego;
CBT	„Constant Beamwidth Transducer”, przetwornik o stałej szerokości wiązki;
DSP	„Digital Sound Processing”, cyfrowe przetwarzanie dźwięku;
FEM	„Finite Element Method”, metoda elementów skończonych w obliczeniach numerycznych;
FFF	„Fused Filament Fabrication”, metoda druku 3D polegająca na depozycji termoplastycznego filamentu;
GMG	„Geometric Multigrid”, moduł rozwiązujący, przyspiesza zbieżność metody iteracyjnej, rozwiązując problem elementów skończonych na serii siatek, zamiast na pojedynczej siatce;
GMRES	„Generalized Minimal Residual Method”, metoda iteracyjna do numerycznego rozwiązywania nieokreślonego niesymetrycznego układu równań liniowych;
mSLA	„Masked Stereolithography Aparatus”, metoda druku 3D wykorzystująca selektywne maskowanie światła UV;
PCIe	„Peripheral Component Interconnect Express”, połączenie point-to-point karty rozszerzeń z kontrolerem procesora;
RAM	„Random Access Memory”, pamięć operacyjna, podstawowa;
USB	„Universal Serial Bus” uniwersalna magistrala szeregową;

Wykaz oznaczeń

A_m	jednowymiarowa macierz współczynników używanych do parametrycznego skalowania macierzy soczewki [bezwymiarowa];
a_n	normalne przyspieszenie [m/s ²];
A_x, A_y	współczynniki skalowania macierzy wyjściowej soczewki [bezwymiarowe];
B, C	współczynniki skalowania macierzy soczewki [bezwymiarowe];
c_0	prędkość dźwięku w powietrzu, 343 [m/s] dla temperatury 20°C;
$D_{m,n}$	droga między odpowiadającymi sobie komórkami macierzy wejściowej i wyjściowej;
e_k	kierunek fali [bezwymiarowy];
f	częstotliwość [Hz];
f_{xmin}	częstotliwość odcięcia w płaszczyźnie poziomej [Hz];
f_{ymin}	częstotliwość odcięcia w płaszczyźnie pionowej [Hz];
I	natężenie dźwięku [W/m ²];
k	liczba falowa [1/m];
L	poziom ciśnienia akustycznego [dB SPL];
l_0	długość pola bliskiego [m];
l_1, l_2	wymiary źródła w kierunku 'poziomym' i 'pionowym' [m];
p	ciśnienie akustyczne [Pa];
p_A	bezwzględne/statyczne ciśnienie, przyjęto $0,1 \cdot 10^6$ [Pa];
p_b	ciśnienie akustyczne tła [Pa];
$\tilde{p}_{ext}$	ciśnienie pola dalekiego wypromieniowywanego przez pulsującą kulę [Pa];
p_s	rozproszone ciśnienie akustyczne [Pa];
p_t	całkowite ciśnienie akustyczne [Pa];
q_d	źródło domeny dipolowej [N/m ³];
Q_m	źródło domeny monopolowej [1/s ²];
T	temperatura bezwzględna, przyjęto 293,15 [K];
V	napięcie [V];
v_0	prędkość początkowa [m/s];
v_n	normalna prędkość [m/s];
W_p	całkowita moc wypromieniowana [W];

x_0	położenie źródła [m];
Y_i	jednowymiarowa macierz współrzędnych Y macierzy wyjściowej po skalowaniu parametrycznym [bezwymiarowy];
Z, Z_{sp}	właściwa impedancja akustyczna [Pa·s/m];
Z_{ac}	impedancja akustyczna [Pa·s/m ³];
$\Delta t_{m,n}$	opóźnienie w poszczególnych komórkach soczewki [s];
θ_0	połowiczny kąt wycinka pulsującej sfery [rad];
θ_1, θ_2	kąty między normalną do powierzchni źródła a punktem obserwacji [rad];
ρ, ρ_c	gęstość [kg/m ³];
ω	pulsacja [rad/s];

Spis treści

Podziękowania.....	i
Streszczenie.....	ii
Abstract.....	iii
Wykazy.....	iv
Wykaz akronimów.....	iv
Wykaz oznaczeń.....	v
Wprowadzenie.....	1
1.1. Kontekst problemu i motywacja.....	1
1.2. Stan obecny.....	2
1.3. Cel i teza pracy.....	4
1.4. Układ pracy.....	4
Proponowane rozwiązanie.....	6
2.1. Opis geometrii soczewek.....	6
2.2. Ustroje parametryczne.....	9
2.3. Podsumowanie opisanego rozwiązania.....	11
Przygotowanie symulacji.....	13
3.1. Badany przypadek.....	13
3.2. Wytyczne geomerii.....	15
3.3. Model 3D.....	15
3.4. Model w symulacji.....	15
3.5. Interfejs fizyczny.....	16
3.6. Definicje geometrii.....	17
3.7. Metoda obliczeniowa.....	18
Wyniki symulacji.....	19
4.1. Prezentacja danych.....	19

4.2. Pole akustyczne.....	20
4.3. Poziom ciśnienia akustycznego.....	24
Przygotowanie pomiarów.....	27
5.1. Wydruk soczewki.....	27
5.2. Układ pomiarowy.....	30
5.3. Serie pomiarowe.....	34
5.4. Warunki pomiarowe.....	34
Wyniki pomiarów.....	36
6.1. Pole bliskie.....	36
6.2. Zysk kierunkowości.....	39
6.3. Porównanie symulacji z pomiarami.....	44
6.4. Charakterystyka kierunkowości.....	49
6.5. Szerokość wiązki.....	52
6.6. Stała kierunkowość.....	55
6.7. Pulsująca elipsoida.....	56
Podsumowanie.....	59
7.1. Symulacje.....	59
7.2. Pomiary.....	60
7.3. Zgodność pomiarów i symulacji.....	60
7.4. Wpływ soczewki.....	61
7.5. Dowód tezy.....	62
7.6. Zastosowanie.....	63
7.7. Dalsze badania.....	63
Literatura.....	65

Rozdział 1.

Wprowadzenie

1.1. Kontekst problemu i motywacja

Akustyczne rozwiązania techniczne stosowane obecnie w urządzeniach głośnikowych opierają się głównie na użyciu soczewek mających na celu uzyskanie płaskiego frontu falowego o prostokątnym kształcie przy wykorzystaniu przetworników generujących kuliste czoło fali [8, 10].

Uzyskane w ten sposób urządzenia są zazwyczaj grupowane w pionową linię, której czoło fali jest modyfikowane poprzez geometryczne ustawienie poszczególnych elementów oraz cyfrową obróbkę sygnału docierającego do każdego z urządzeń [22]. Takie rozwiązanie, nazywane systemem wyrównanym liniowo, wymaga stosowania znacznej liczby urządzeń głośnikowych, ze względu na bardzo ograniczony kąt promieniowania każdego z nich w płaszczyźnie pionowej. Liczba urządzeń przekłada się na mnogość niezbędnych wzmacniaczy mocy oraz kanałów procesorów sygnałowych.

Wariantami powyższego rozwiązania są soczewki kanałowe oraz płytowe o zróżnicowanej geometrii [1]. Wszystkie z nich opierają się na zasadzie mechanicznego wydłużania lub skracania drogi przebytej przez jednostkowy wycinek czoła fali, w celu wprowadzenia przesunięć fazowych pomiędzy poszczególnymi fragmentami wylotu soczewki. Dotychczasowe rozwiązania oferują sterowanie kształtem czoła fali w jednej z płaszczyzn, gdzie krzywizna czoła fali w drugiej płaszczyźnie jest determinowana przez tubę lub szczelinę o określonych wymiarach w porównaniu z długością generowanej fali.

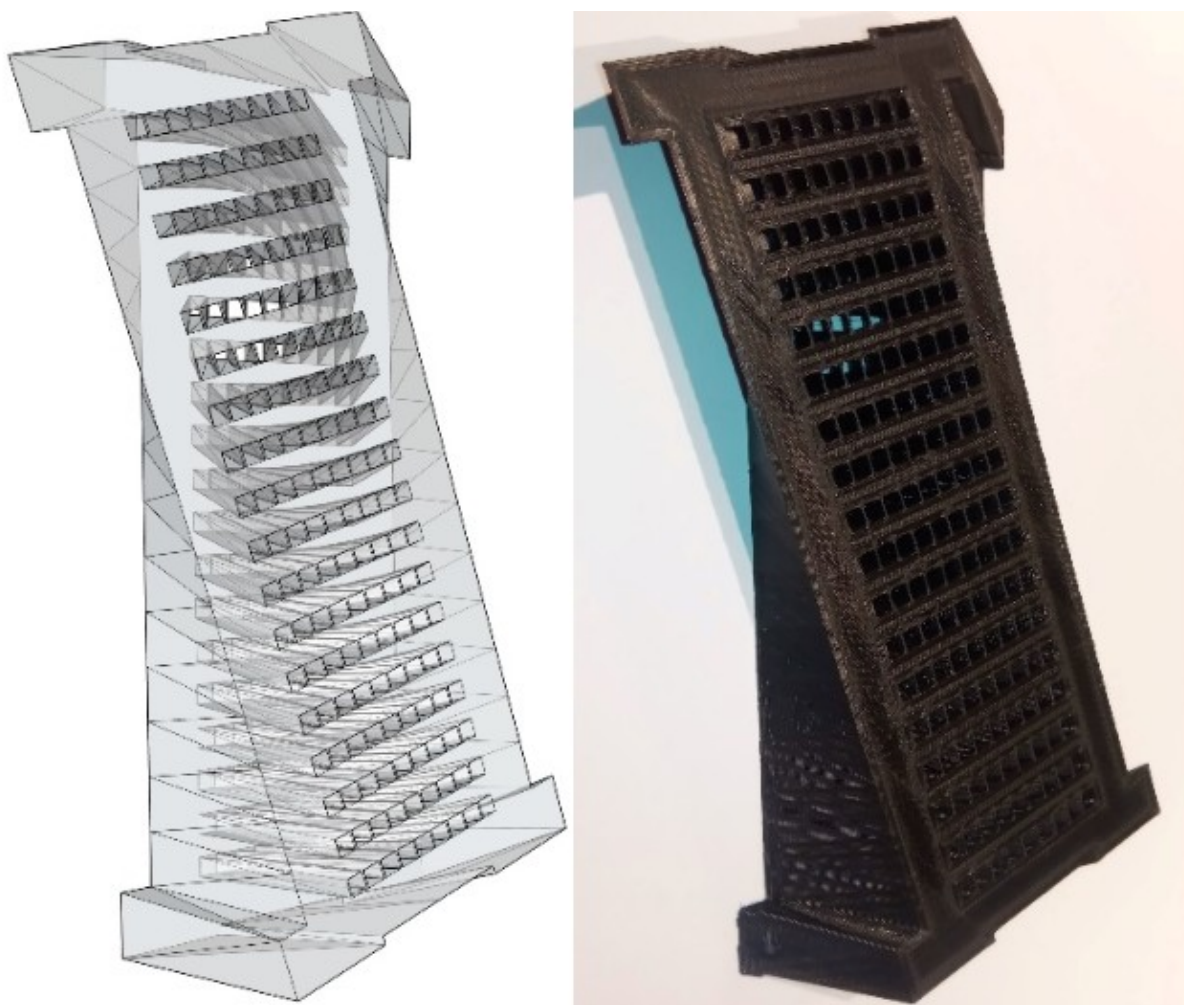
Innym rodzajem soczewki akustycznej są kryształy fononiczne [5], których zasada działania opiera się na strukturze periodycznej, więc działanie jest ograniczone do konkretnych długości fali. Poszukiwana alternatywa wymaga możliwości pracy w jak

najszerszym zakresie częstotliwości. Występowały również próby stworzenia soczewki z a pomocą „metamateriałów” [23] które w inny sposób przeprowadzają dystrybucję opóźnień czoła fali, prawdopodobnie wprowadzając znaczące tłumienie.

1.2. Stan obecny

Dowolny wycinek powierzchni w polu akustycznym można podzielić na fragmenty, tworząc z nich macierz znajdującą się na wejściu soczewki. Wyjściem soczewki jest macierz o tej samej liczbie komórek, lecz o innej orientacji przestrzennej. Komórki macierzy wejściowej i wyjściowej są połączone kanałami. Różnica w rozmieszczeniu komórek pomiędzy dwiema macierzami wprowadza różnicę długości kanałów je łączących, efektem tego można regulować opóźnienie fazowe w każdej z komórek wyjściowych.

Najprostszy przypadek, gdzie rozmiary komórek w obu macierzach są jednakowe a przetwornik oraz soczewka są osiowosymetryczne poruszono w pracy [3]. Celem było zwiększenie kąta promieniowania przetwornika ultradźwiękowego. Regulację opóźnień uzyskano poprzez obrót macierzy wyjściowej względem wejściowej wokół osi symetrii, które były połączone helikalnymi kanałami. Opóźnienie jest najmniejsze blisko osi symetrii, gdzie długość kanałów jest najmniejsza, stopniowo zwiększając się w kolejnych koncentrycznych rzędach.



Rysunek 1.1 Projekt obrotowej soczewki akustycznej dla przetwornika AMT (z lewej) oraz wydrukowany prototyp (z prawej)

Powyższe rozwiązania zostały zastosowane w celu zakrzywienia frontu falowego przetwornika średnio-tonowego w pracy [3]. Kanały łączące macierze miały stałą długość, a opóźnienie wynikało z odległości komórek od punktu pomiarowego poprzez krzywienie wylotu soczewki.

Koncepcję obracania macierzy wyjściowej można zastosować także dla innych kształtów przetworników (Rysunek 1.1). Na potrzeby pierwszych eksperymentów źródłem fali płaskiej był głośnik wstęgowy typu AMT („Air Motion Transformer”), który charakteryzuje się generowaniem prostokątnego wycinka fali powierzchniowej, gdzie wszystkie punkty czoła fali na powierzchni wylotu są w tej samej fazie. Problemem związanym z osiągnięciem wysokiej sprawności, szerokiego pasma przenoszenia oraz dużej mocy znamionowej tego typu głośników jest konieczność stosowania membrany o dużym polu powierzchni czynnej, co idzie w parze ze znacznymi rozmiarami wylotu przetwornika, często wielokrotnie przekraczającymi długość generowanych fal akustycznych.

Zastosowanie soczewki pozwala na osiągnięcie dowolnych kątów promieniowania takiego głośnika w płaszczyźnie pionowej, niezależnie od jego rozmiarów, co zostało potwierdzone pomiarami, które są zgodne z wynikami uzyskanymi we wspomnianych wcześniej publikacjach naukowych. [3, 7]

Dotychczasowe rozwiązania cechują się istotnym ograniczeniem: soczewki wykorzystujące obrót wyjścia względem wejścia pozwalają na regulację krzywizny czoła fali tylko w jednym kierunku. Dla soczewek, o kształcie wielokąta foremego lub koła, za pomocą kąta obrotu oraz grubości struktury kształtowaniu podlega promień krzywizny fali kulistej, nie ma możliwości osiągnięcia kształtu fali elipsoidalnej lub cylindrycznej. W przypadku innych kształtów ustroju, parametry wpływają na większe zakrzywienie frontu falowego w kierunku większego wymiaru. Dla prostokątnej soczewki tego typu, na wyjściu powstaje fala elipsoidalna, gdzie stosunek promieni elipsy odpowiada stosunkowi wymiarów struktury.

1.3. Cel i teza pracy

Nauka oraz inżynieria stojąca za projektowaniem przetworników elektroakustycznych oraz urządzeń głośnikowych spotyka się ze skomplikowanymi ograniczeniami wynikającymi z niedopasowania kąтового zakresu promieniowania źródeł oraz kształtów ich frontów falowych. Fizyczne wymiary i rozmieszczenie głośników, także urządzeń głośnikowych, w relacji do generowanych długości fali związane są z występowaniem interferencji na powierzchni wspólnego frontu falowego. W wyniku niedopasowania fazowego oraz amplitudowego powstaje źródło dźwięku zniekształcające sygnał akustyczny w zmienny sposób w całej objętości pola akustycznego. Dla rozwiązania wyżej wymienionych problemów w niniejszej pracy zaproponowano zastosowanie soczewki w formie matrycy falowodów, które dzielą czoło fali na skończoną ilość fragmentów oraz wprowadzają kontrolowane opóźnienie każdego z nich. W efekcie powstaje narzędzie wpływające na rozkład fazy na powierzchni źródła. Wyżej wspomniana koncepcja była już przedstawiona w publikacjach naukowych [3, 7]. Dotychczasowe rozwiązania opierały się na obrocie macierzy wyjściowej względem wejściowej.

Stosując dostępną wiedzę i technikę autor stawia tezę:

Jest możliwe stworzenie soczewki akustycznej pozwalającej na regulację krzywizn czoła fali w dwóch płaszczyznach, dla dowolnego kształtu źródła.

1.4. Układ pracy

Niniejsza rozprawa doktorska została podzielona na 7 rozdziałów.

Rozdział 1 stanowi wstęp do pracy, przedstawiając motywację i cele w kontekście istniejących rozwiązań przedstawionych w innych badaniach. W tej części zostaje sformułowana teza.

Rozdział 2 opisuje pomysł na rozwiązanie techniczne w postaci soczewki akustycznej. Przedstawione jest sposób działania i spodziewane efekty jakie można uzyskać poprzez manipulację geometrią matrycy wejściowej i wyjściowej.

Rozdział 3 przedstawia proces przygotowania modelu soczewki oraz definicji użytych do przeprowadzenia symulacji. Wszystkie kroki i wybory niezbędne do przeprowadzenia obliczeń są wyjaśnione.

Rozdział 4 zawiera prezentację wyników uzyskanych w symulacjach, wraz z opisami i wstępnymi wnioskami.

Rozdział 5 prezentuje wszystkie etapy przygotowania pomiarowej części badań, od procesu wydruku prototypu, przez przygotowanie i kalibrację systemu pomiarowego po badanie warunków pomiarowych.

Rozdział 6 pokazuje wyniki pomiarów, zaczynając od rozgraniczenia pola bliskiego i dalekiego, poprzez porównanie wartości zmierzonych z wartościami uzyskanymi w symulacjach, kończąc na charakteryzowaniu źródła wyposażonego w soczewkę w porównaniu z przetwornikiem bez soczewki.

Rozdział 7 podsumowuje całą pracę, zawiera wnioski z przeprowadzonych symulacji oraz pomiarów, dowód tezy oraz perspektywy dalszych badań. Przedstawia również zastosowania praktyczne oraz ocenę działania opracowanego rozwiązania.

Rozdział 2.

Proponowane rozwiązanie

2.1. Opis geometrii soczewek

Propozycją struktury dyskretyzującej, która pozwala na regulację krzywizny generowanej fali w dwóch płaszczyznach jest macierz wyjściowa o rozmiarach i pozycji innej niż wejściowa. Skalowanie rozmiaru oraz pozycji wyjściowej macierzy w obu kierunkach umożliwia kształtowanie czoła fali, jako płaskie, cylindryczne, elipsoidalne, oraz inne krzywizny przestrzenne.

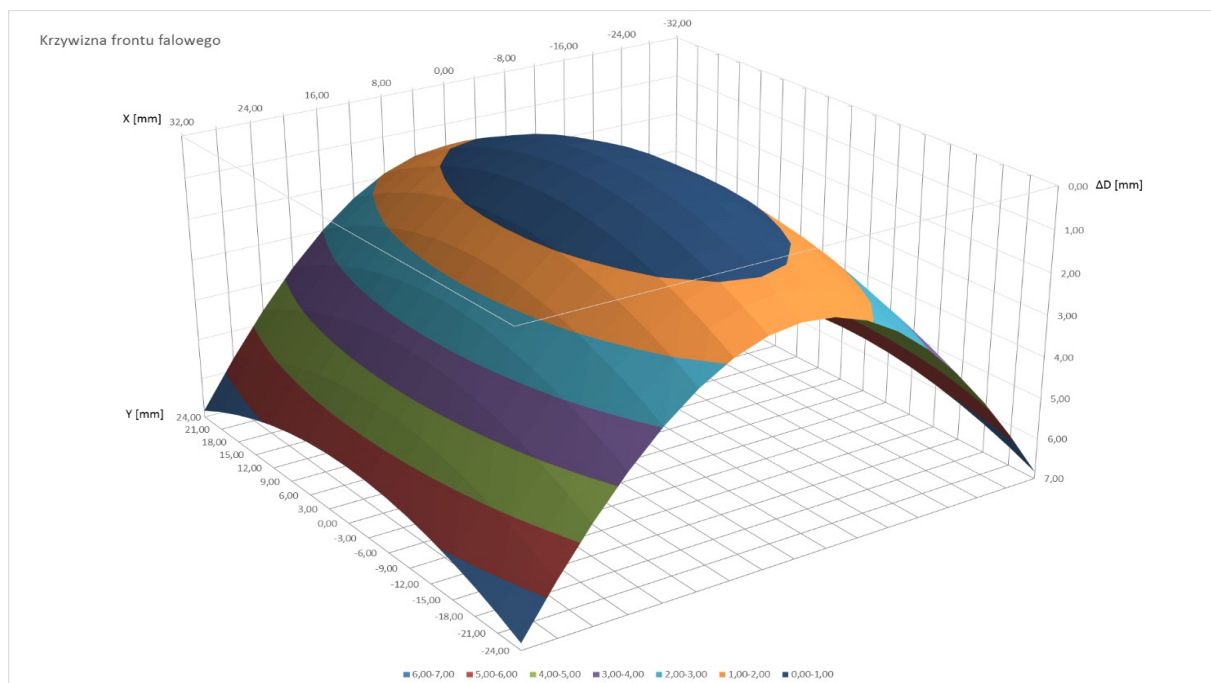
Zakładając wymiary i rozkład komórek macierzy, ze wzoru (2.1) można obliczyć drogę, czyli długość każdego tunelu łączącego komórkę wejściową z wyjściową. Dla każdej komórki macierzy można obliczyć drogę. Gdy macierz wyjściowa znajdująca się w pozycji $t = 20$ mm (grubość soczewki) zostanie powiększona poprzez iloczyn współrzędnych X_i ze współczynnikiem skalującym A_x oraz analogicznie współrzędnych Y_i ze współczynnikiem skalującym A_y , otrzymana zostaje macierz wyjściowa o symetrycznym rozkładzie opóźnień, których wartość rośnie dla każdej komórki wraz z odległością od środka symetrii. Dystrybucję opóźnień $\Delta t_{m,n}$ dla każdej z komórek wyjściowych obliczono ze wzoru (2.2).

$$D_{m,n} = \sqrt{(A_x X_m - X_n)^2 + (A_y Y_n - Y_n)^2 + t^2} \quad (2.1)$$

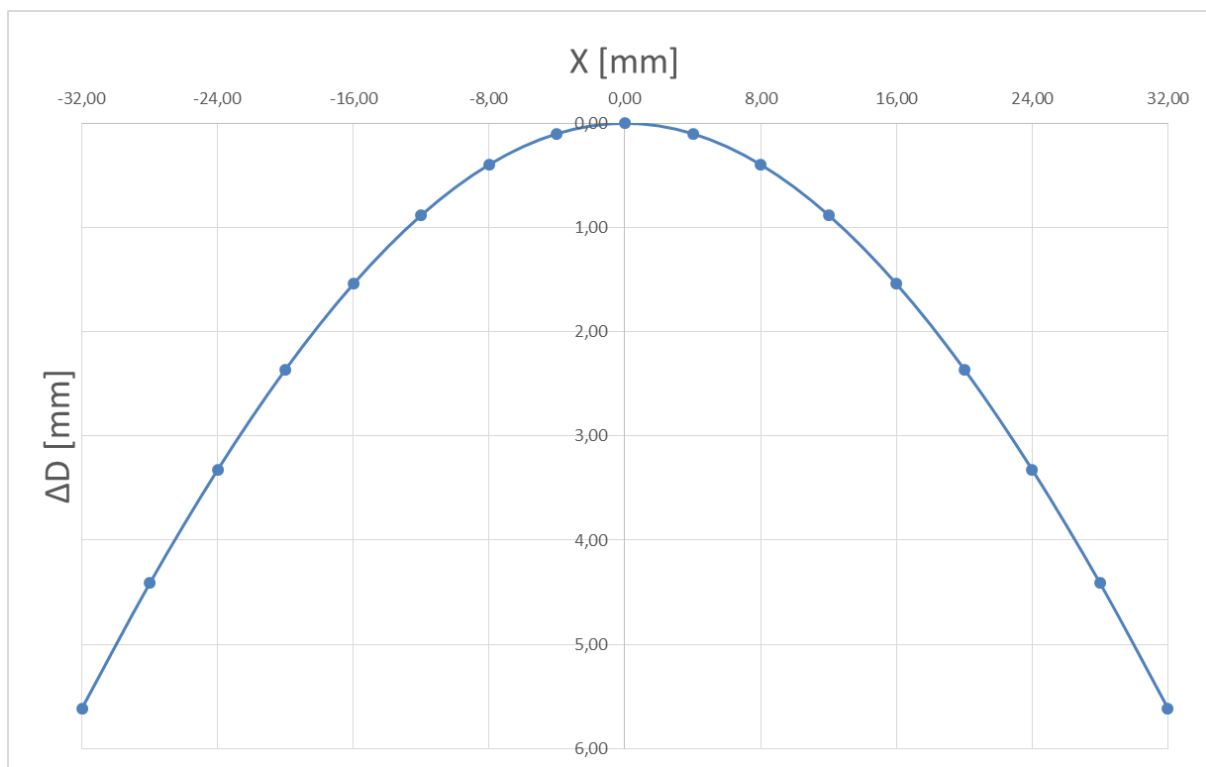
$$\Delta t_{m,n} = \frac{D_{m,n} - h}{c} \quad (2.2)$$

Gdzie $D_{m,n}$ - droga między odpowiadającymi sobie komórkami macierzy wejściowej i wyjściowej, $\Delta t_{m,n}$ - opóźnienie w poszczególnych komórkach soczewki, A_x , A_y - współczynniki skalowania macierzy wyjściowej soczewki, kolejno dla osi X oraz Y.

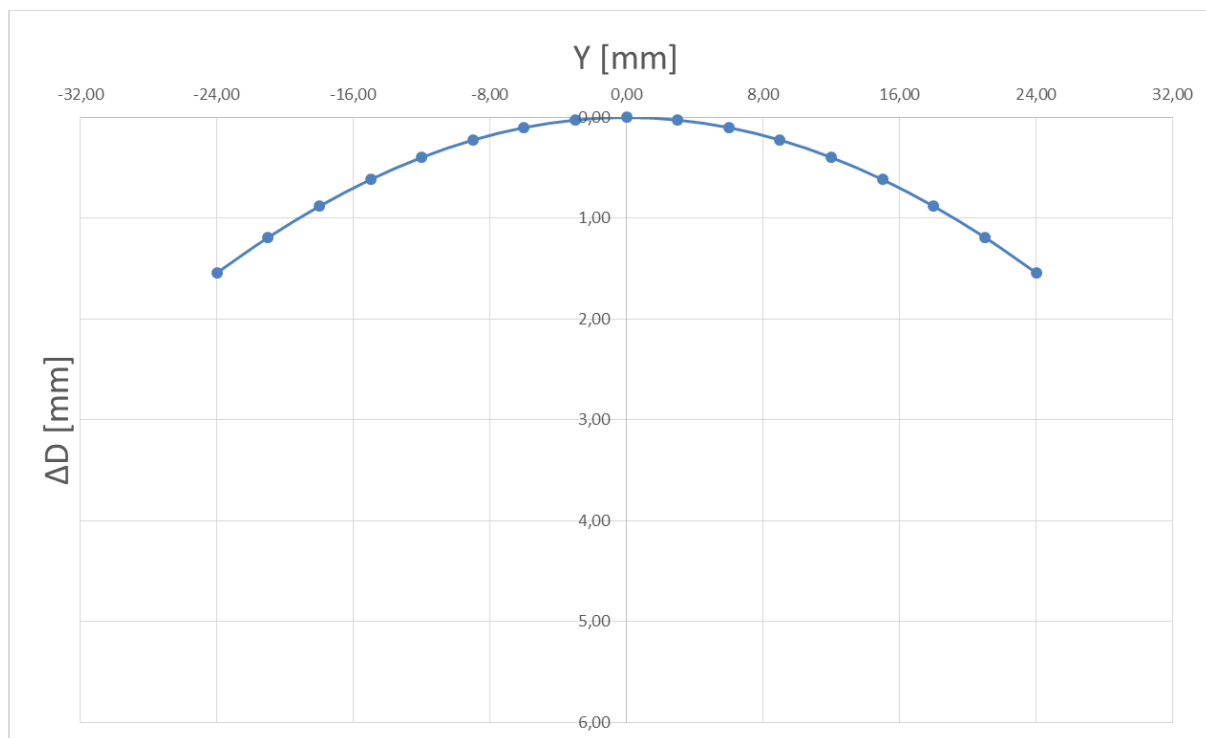
Wykorzystując obliczony przyrost drogi, dla każdej z komórek wyjściowych soczewki, można wizualnie przedstawić front falowy jako powierzchnię łączącą punkty tego przyrostu na wykresie przestrzennym (Rysunek 2.1). Korzystając z danych znajdujących się na osiach symetrii frontu falowego, wyznaczono krzywiznę w kierunku X (Rysunek 2.2) oraz Y (Rysunek 2.3). Powyższy przykład pokazuje możliwość niezależnego sterowania dwiema krzywiznami frontu falowego, co jest narzędziem oferującym większą kontrolę niż w przypadku dotychczas opublikowanych propozycji.



Rysunek 2.1 Wizualna reprezentacja frontu falowego za pomocą przestrzennej dystrybucji przyrostu drogi ΔD , dla soczewki o grubości $t = 20$ mm oraz współczynnikach skalowania: $A_x = 2$, $A_y = 1,5$



Rysunek 2.2 Krzywizna frontu falowego w osi X, dystrybucja przyrostu drogi ΔD , dla soczewki o grubości $t = 20$ mm oraz współczynnikach skalowania: $A_x = 2$, $A_y = 1,5$



Rysunek 2.3 Krzywizna frontu falowego w osi Y, dystrybucja przyrostu drogi ΔD , dla soczewki o grubości $t = 20$ mm oraz współczynnikach skalowania: $A_x = 2$, $A_y = 1,5$

2.2. Ustroje parametryczne

Kolejnymi możliwościami, którymi cechują się proponowane ustroje jest asymetryczne skalowanie za pomocą dowolnej funkcji, oraz przesunięcie pozycji macierzy wyjściowej w dowolnym kierunku. Aby zrealizować przyrost odległości pomiędzy komórkami macierzy wyjściowej w kierunku jednego z wymiarów soczewki, w tym przykładzie jest to kierunek Y , zastosowano współczynnik A_m , gdzie $i = 1$ oraz $m = 1$ odpowiada pierwszemu, górnemu rzędowni komórek wyjściowych.

$$A_m = BA_{m-1} + C \quad (2.3)$$

$$Y_i = Y_m + A_m \quad (2.4)$$

gdzie A_m - jednowymiarowa macierz współczynników, B – współczynnik paraboliczny, C – współczynnik liniowy, Y_i – jednowymiarowa macierz współrzędnych Y wyjściowej macierzy po skalowaniu parametrycznym.

Dla przyjętych parametrów B oraz C otrzymano ze wzorów (2.3) i (2.4) tabele wartości współczynników (Tabela 2.1) oraz przeliczonych wartości współrzędnych Y wyjściowej macierzy (Tabela 2.2). Współczynnik skalowania dla tego przykładu wynosi $A_x = 1,5$, współczynnik A_y pominięto, aby widoczny był tylko wpływ parametrycznego skalowania na krzywiznę frontu fali w osi Y (Rysunek 2.6).

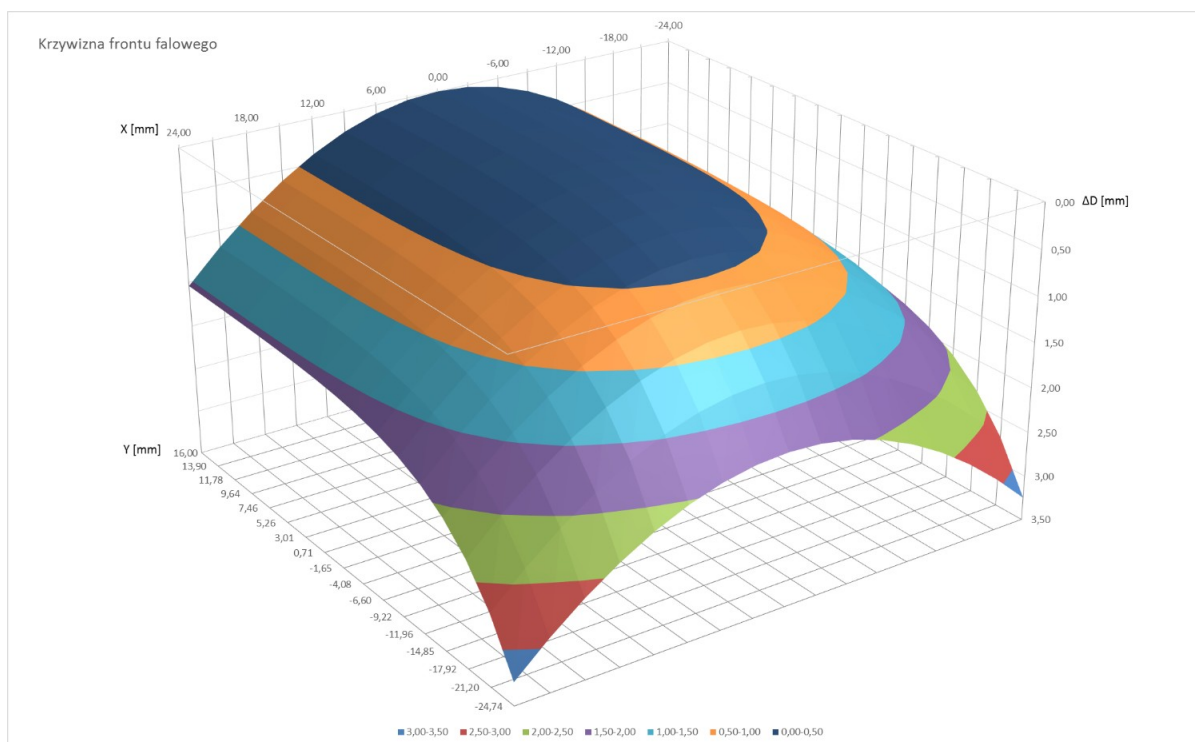
Tabela 2.1 Transponowana macierz współczynników A_m , dla $B = 1,2$ oraz $C = -0,1$

0,00	-0,10	-0,22	-0,36	-0,54	-0,74	-0,99	-1,29	-1,65	-2,08	-2,60	-3,22	-3,96	-4,85	-5,92	-7,20	-8,74
------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

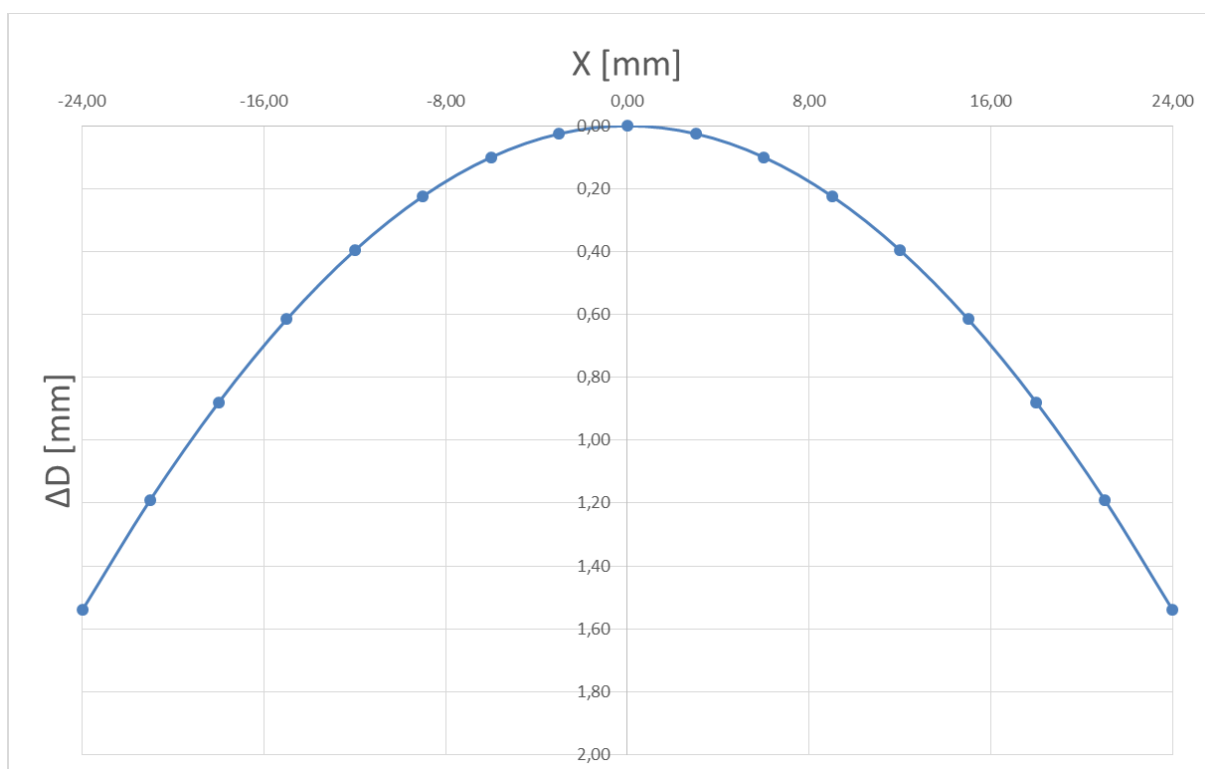
Tabela 2.2 Transponowana macierz obliczonych wartości współrzędnych Y_i , dla $B = 1,2$ oraz $C = -0,1$

16,00	13,90	11,78	9,64	7,46	5,26	3,01	0,71	-1,65	-4,08	-6,60	-9,22	-11,96	-14,85	-17,92	-21,20	-24,74
-------	-------	-------	------	------	------	------	------	-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------

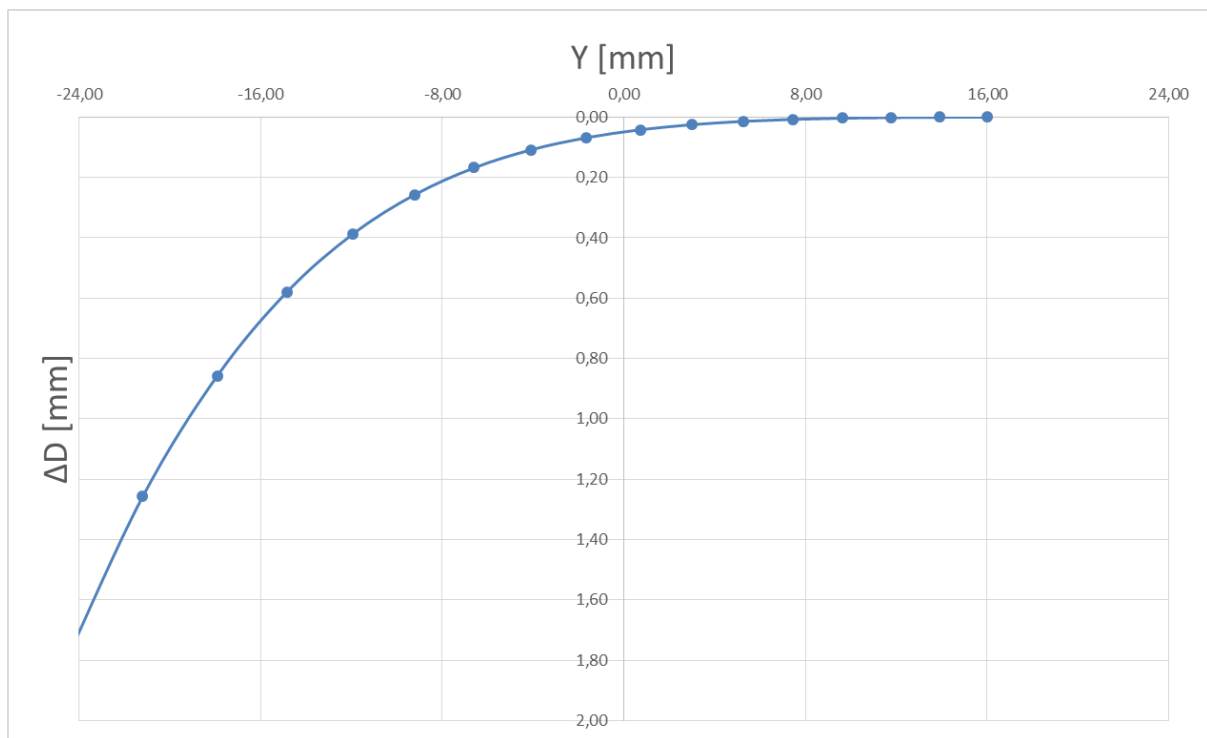
Tak jak w poprzednim przykładzie, dokonano wizualnej reprezentacji frontu falowego w przestrzeni (Rysunek 2.4) oraz jego zakrzywienie w osi X (Rysunek 2.5). Reprezentacja frontu falowego pokazuje płynne przejście z cylindrycznego kształtu frontu fali w kulisty.



Rysunek 2.4 Wizualna reprezentacja frontu falowego za pomocą przestrzennej dystrybucji przyrostu drogi ΔD , dla soczewki o grubości $t = 20$ mm oraz współczynnikach skalowania: $A_x = 1,5$; $A_m = 1,2A_{m-1} - 0,1$



Rysunek 2.5 Krzywizna frontu falowego w osi X, dystrybucja przyrostu drogi ΔD , dla soczewki o grubości $t = 20$ mm oraz współczynnikach skalowania: $A_x = 1,5$; $A_m = 1,2A_{m-1} - 0,1$



Rysunek 2.6 Krzywizna frontu falowego w osi Y, dystrybucja przyrostu drogi ΔD , dla soczewki o grubości $t = 20$ mm oraz współczynnikach skalowania: $A_x = 1,5$; $A_m = 1,2A_{m-1}^{-0,1}$

Tego typu źródło cechuje się regulowaną kierunkowością oraz rozkładem natężenia w funkcji wymiaru pionowego źródła. Omawiane soczewki są przykładami wielu osiągalnych typów frontów falowych. Jedynym ograniczeniem w kształtowaniu dystrybucji opóźnienia czoła fali w poszczególnych komórkach macierzy wyjściowej jest wykonalność takiej struktury, czyli warunek, aby kanały łączące obie macierze nie przecinały się.

2.3. Podsumowanie opisanego rozwiązania

Proponowane rozwiązanie cechuje się następującymi zaletami:

- Rozszerzenie możliwości kształtowania frontu falowego
- Nieskomplikowane obliczenia, prosta konstrukcja
- Małe wymiary, w szczególności grubość, co stanowi atrakcyjną alternatywę dla rozwiązań tubowych

Nie jest jednak wolne od ograniczeń:

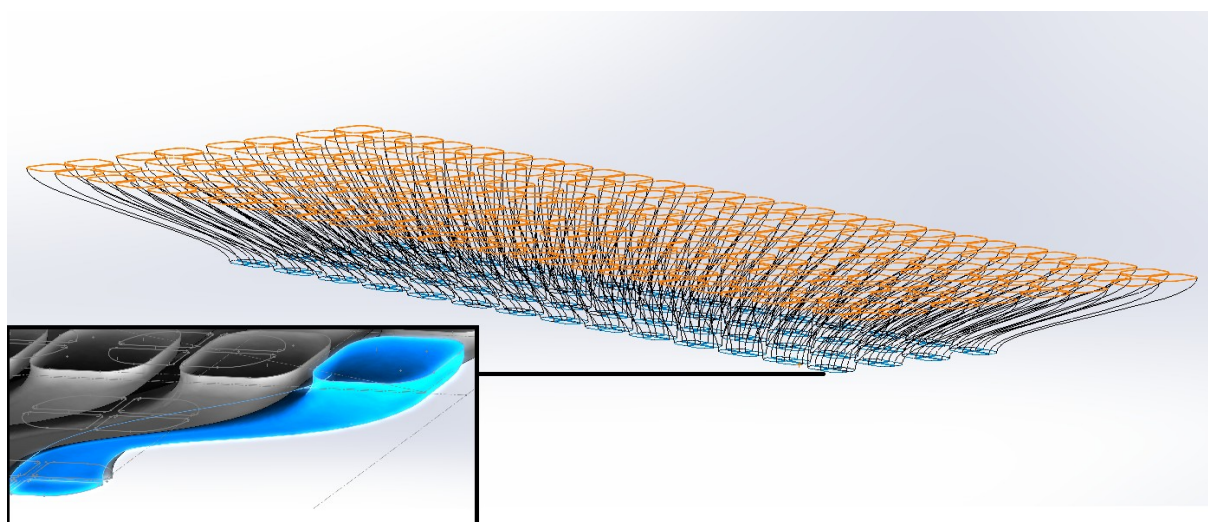
- Brak możliwości skupiania wiązki, tylko rozpraszanie – w przedstawianych przykładach nie ma możliwości wydłużania wewnętrznych tuneli względem zewnętrznych, ten sam problem dotyczy soczewek obrotowych
- Trudności w dopasowaniu amplitudowym matrycy wielu soczewek – zewnętrzne komórki są połączone długimi kanałami pod znaczącym kątem od normalnej do membrany, co może mieć wpływ na zwiększenie tłumienia

Rozdział 3.

Przygotowanie symulacji

3.1. Badany przypadek

Zaproponowano strukturę dyskretyzującą pozwalającą regulować krzywiznę generowanej fali w dwóch płaszczyznach (Rysunek 3.1), gdzie macierz wyjściowa jest większa od wejściowej. Zmieniając rozmiar i/lub pozycję macierzy wyjściowej wzdłuż każdego z wymiarów pozwala na uzyskanie różnych kształtów czoła fali, między innymi płaskie, cylindryczne elipsoidalne itp.



Rysunek 3.1 Matryca wejściowa (niebieski) i wyjściowa (pomarańczowy) proponowanej soczewki, z wizualizacją pojedynczego kanału

Każdy przetwornik ma swoją specyficzną charakterystykę promieniowania, kierunkowość wzrasta wraz z rozmiarem membrany i częstotliwością, co skutkuje wyższymi wartościami kl (3.1). Kształt membrany, jej właściwości materiałowe i lokalizacja źródła wzbudzenia determinują nieliniowe zachowanie przy wyższych częstotliwościach, gdzie

ruch powierzchni jest niejednorodny, co dodatkowo komplikuje charakterystykę promieniowania wraz ze wzrostem częstotliwości. Dla tłoka prostokątnego o równomiernym rozkładzie prędkości (charakteryzującym się wartością Q i sprawnością pojedynczego źródła punktowego) ciśnienie akustyczne jest określone wzorem:

$$p(r, \theta_1, \theta_2) = \frac{\rho_0 c |Q| k}{2\pi r} \frac{\sin \frac{k l_1 \sin \theta_1}{2}}{\frac{k l_1 \sin \theta_1}{2}} \cdot \frac{\sin \frac{k l_2 \sin \theta_2}{2}}{\frac{k l_2 \sin \theta_2}{2}} \quad (3.1)$$

Gdzie p jest ciśnieniem w polu dalekim, wypromieniowywanym przez prostokątny tłok w odgrodzie, zależy od wymiarów tłoka oraz częstotliwości (w funkcji liczby falowej k i kierunków θ_1 i θ_2).

Kierunkowość jest iloczynem kierunkowości ciągłych źródeł liniowych o długości l_1 i l_2 (w tym przypadku są to długości boków prostokąta), a kąty θ_1 i θ_2 są kątami między normalną do powierzchni tłoka a występnymi łączącymi środek tłoka z punktem obserwacyjnym w polu dalekim, na płaszczyznach prostopadłych do powierzchni tłoka i równoległych odpowiednio do l_1 i l_2 [24].

Przykładem przetwornika, który charakteryzuje się równomiernym rozkładem prędkości na całej membranie, jest głośnik izodynamiczny. Jest najprostszy do symulacji i generuje płaskie czoło fali zgodnie z zasadą działania. Ten typ przetwornika może być stosowany w szerokim zakresie częstotliwości, jeśli rozmiar membrany jest znaczny. Wadą wykorzystania dużej powierzchni promieniowania do wytworzenia ciśnienia akustycznego przy długościach fal ułamek jego wielkości jest wysoka kierunkowość, rosnąca wraz z częstotliwością. Rozwiązaniem tego problemu jest soczewka, która jest w stanie przekształcić płaskie czoło fali akustycznej w zakrzywione. Spowoduje to obniżenie kierunkowości dla wysokich częstotliwości, ponieważ zakrzywione czoło fali będzie zachowywać się podobnie do tego wypromieniowanego z wycinka pulsującej kuli, a nie oscylującej płaskiej powierzchni [9]. Pulsująca kula jest wszech-kierunkowa, ciśnienie pola dalekiego nie jest związane z kierunkiem θ (3.2).

$$\tilde{p}_{ext}(r) = \frac{a}{r} v_r \rho_0 c \frac{-ika}{1 - ika} \exp(ik(r - a)) \quad (3.2)$$

gdzie $\tilde{p}_{ext}$ jest ciśnieniem pola dalekiego wypromieniowywanego w odległości r od środka pulsującej kuli o promieniu a .

3.2. Wytyczne geomerii

W ramach przygotowań do symulacji należy zaprojektować model soczewki. Macierz wejściowa pochodzi z rysunków technicznych wybranego przetwornika izodynamicznego. Matryca wyjściowa została przeskalowana w górę o współczynnik 1,372 w kierunku pionowym (dłuższy wymiar przetwornika) i o współczynnik 2,057 w kierunku poziomym (krótszy wymiar przetwornika). Przy grubości soczewki 15 mm obliczono te współczynniki w celu uzyskania rozkładu odległości między komórkami wejściowymi i wyjściowymi przybliżającego czoło fali o promieniu krzywizny $X = 130$ mm w kierunku poziomym i $Y = 290$ mm w kierunku pionowym. Rzeczywisty rozkład opóźnień wzdłuż osi symetrii jest paraboliczny, w wyniku liniowego skalowania macierzy wyjściowej. Wynikowe czoło fali tej soczewki powinno być wycinkiem elipsoidy [18].

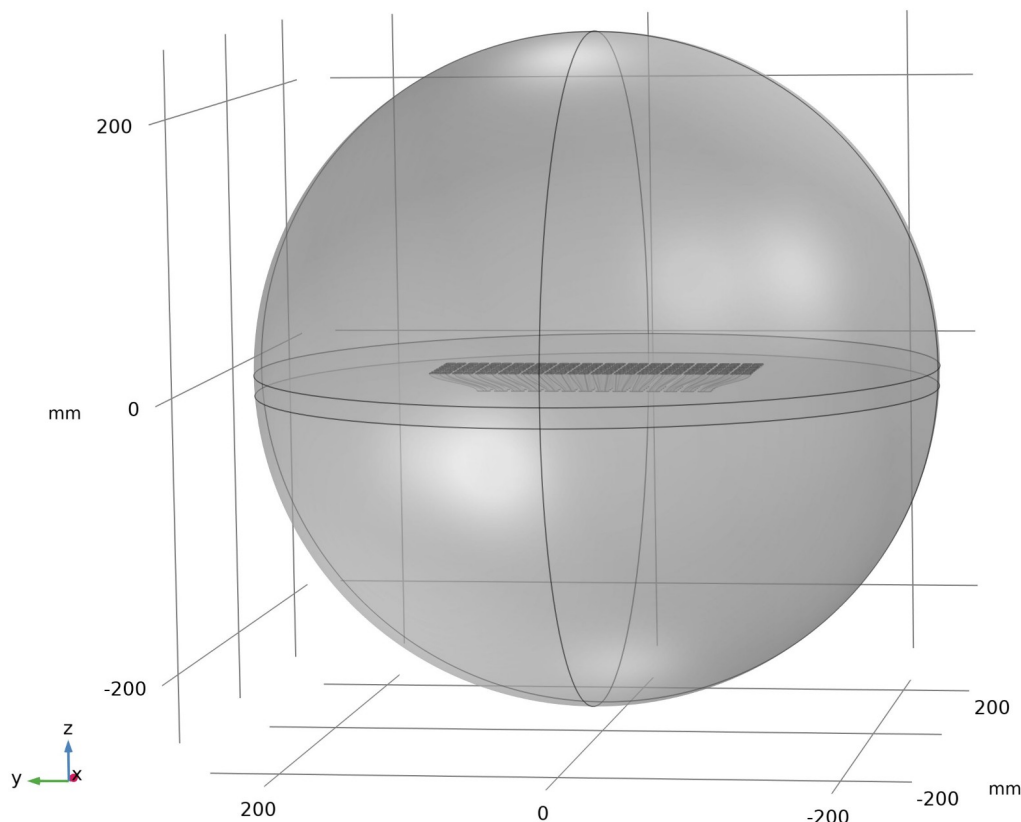
3.3. Model 3D

Aby stworzyć geometrię soczewki, opracowano parametryczny model konstrukcji w oprogramowaniu CAD. Zmienne tego modelu składały się z: współczynników skalowania macierzy wyjściowej, grubości soczewki, grubości ścianki między kanałami, kształtu i styczności kanału itp. Kanały łączące komórki wejściowe z wyjściowymi zostały zamodelowane za pomocą krzywych parametrycznych jako wytycznych, z końcami prostopadłymi do powierzchni tych komórek. Przygotowana geometria została wyeksportowana do oprogramowania symulacyjnego.

3.4. Model w symulacji

Model został przygotowany do badań metodą elementów skończonych (FEM). Ze względu na ograniczone zasoby obliczeniowe geometria została zamknięta w kuli o średnicy 500 mm. Komputer na którym były wykonywane obliczenia oraz obróbka wyników to mobilna stacja robocza, wyposażona w sześćo-rdzeniowy procesor „Intel Core i7-10850H”, 128 GB pamięci operacyjnej DDR4-2933, dysk NVME „Micron CT1000P5PSSD8” oraz kartę graficzną „Nvidia GeForce RTX 2080 Super”. Wielkość pamięci operacyjnej była niewystarczająca aby zmieścić w niej wszystkie zmienne używane w obliczeniach, rozszerzono ją poprzez wydzielony na dysku twardym „plik stronicowania”, zwiększając dostępną dla programu pamięć do 896 GB. Mimo zastosowania szybkiego dysku z interfejsem PCIe, jest on zdecydowanie wolniejszy od fizycznej pamięci RAM zarówno pod względem przepustowości danych jak i czasu dostępu, co skutkowało dramatycznym wydłużeniem czasu obliczeń. Większe rozmiary symulacji, a także możliwość wykorzystania metody elementów brzegowych (BEM) wymagały znacznie więcej pamięci operacyjnej, co było poza zasięgiem tych badań. Objętość enkapsulacji została podzielona na elementy czworościenne, przy czym

maksymalna odległość między węzłami została określona jako 1/5 badanej długości fali, co jest warunkiem koniecznym do wykonania obliczeń [6]. Dla największej rozpatrywanej częstotliwości, 20 kHz, odległość ta wynosiła 3,4 mm. Była to największa odległość niezbędna do osiągnięcia konwergencji. Górna połowa badanej sfery składała się z soczewki w przegrodzie, dolna połowa zawierała tylko powierzchnię promieniującą (matrycę wejściową) w przegrodzie [17]. Przegrody sięgały enkapsulującej sfery, tworząc niezależne symulacje głośnika z soczewką oraz bez. Opisaną konfigurację pokazano na rysunku 3.2.



Rysunek 3.2 Konfiguracja geometrii symulacji, transparentność pozwoliła na wizualizację wnętrza sfery

3.5. Interfejs fizyczny

Interfejs fizyczny rozwiązuje równanie Helmholtza w dziedzinie częstotliwości dla danych częstotliwości. Model akustyczny może być częścią większego modelu multi-fizycznego, który opisuje na przykład interakcje między strukturami a falami akustycznymi. Ten interfejs fizyczny jest odpowiedni do modelowania zjawisk akustycznych, które nie obejmują przepływu płynu (efekty konwekcyjne). Ciśnienie akustyczne p , które jest obliczane w akustyce ciśnienia, reprezentuje zmiany akustyczne (lub perturbacje akustyczne) w stosunku do ciśnienia otoczenia. W przypadku braku przepływu ciśnienie otoczenia p_A jest po prostu statycznym ciśnieniem bezwzględnym. Równania falowe i warunki brzegowe są formułowane przy użyciu ciśnienia całkowitego p_t z tak zwanym

wzorem pola rozproszonego. W obecności pola ciśnienia tła definiującego falę ciśnienia tła p_b (może to być na przykład fala płaska), całkowite ciśnienie akustyczne p_t jest sumą ciśnienia obliczonego dla p (które jest wtedy równe ciśnieniu rozproszonemu p_s) i fali ciśnienia tła: $p_t = p + p_b$. Równania zawierają następnie informacje zarówno o polu rozproszonym, jak i polu ciśnienia tła. W celu dokładniejszego opisu symulacji w wykazie oznaczeń wymieniono nazwy i jednostki SI dla najważniejszych wielkości fizycznych w interfejsie Pressure Acoustics, Frequency Domain [6].

3.6. Definicje geometrii

Aby zasymulować propagację ciśnienia akustycznego metodą elementów skończonych, dla wszystkich domen w modelu wybrano wspomniany wcześniej interfejs, z przypisaną temperaturą $T = 293,15$ K i ciśnieniem statycznym $p_A = 0,1$ MPa. Definiuje się go za pomocą następującego równania falowego (3.3) [6]:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p_t - q_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho} = Q_m \quad (3.3)$$

gdzie $k_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2$

Wszystkie powierzchnie w zaimportowanym modelu zostały pogrupowane w domenę obszaru promieniowania i domenę graniczną dla fali akustycznej, którym przypisano początkową wartość ciśnienia jako $p = 0$ Pa. Pierwsza z nich składała się z powierzchni odpowiadających aktywnej powierzchni promieniowania macierzy wejściowej, ze zdefiniowanym jednorodnym rozkładem prędkości, opisanym równaniem falowym (3.4).

$$-n \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p_t - q_d) \right) = i\omega n \cdot v_0 \quad (3.4)$$

gdzie v_0 miało wartość początkową równą 0 w kierunkach x oraz y , równą 0,1 m/s w kierunku z .

Druga składała się ze wszystkich pozostałych powierzchni (ściany kanałów, przegrody), które zostały zdefiniowane jako sztywna bariera dla fali akustycznej (3.5).

$$-n \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p_t - q_d) \right) = 0 \quad (3.5)$$

Powierzchnia sfery, która ograniczała objętość dla obliczeń, została zdefiniowana jako „wypromieniowanie fali akustycznej” zamiast bariery, aby symulować wypromieniowanie fali na zewnątrz, bez odbicia (3.6) [6].

$$-n \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p_t - q_d) \right) + \left(i k_{eq} + \frac{1}{r_{rf}} \right) \frac{p}{\rho} - \frac{r_{rf} \Delta_{||} p}{2 \rho (1 + i k_{eq} r_{rf})} = Q_i \quad (3.6)$$

Gdzie $r_{rf} = |(x - r_o)|$, r_o jest pozycją źródła akustycznego.

3.7. Metoda obliczeniowa

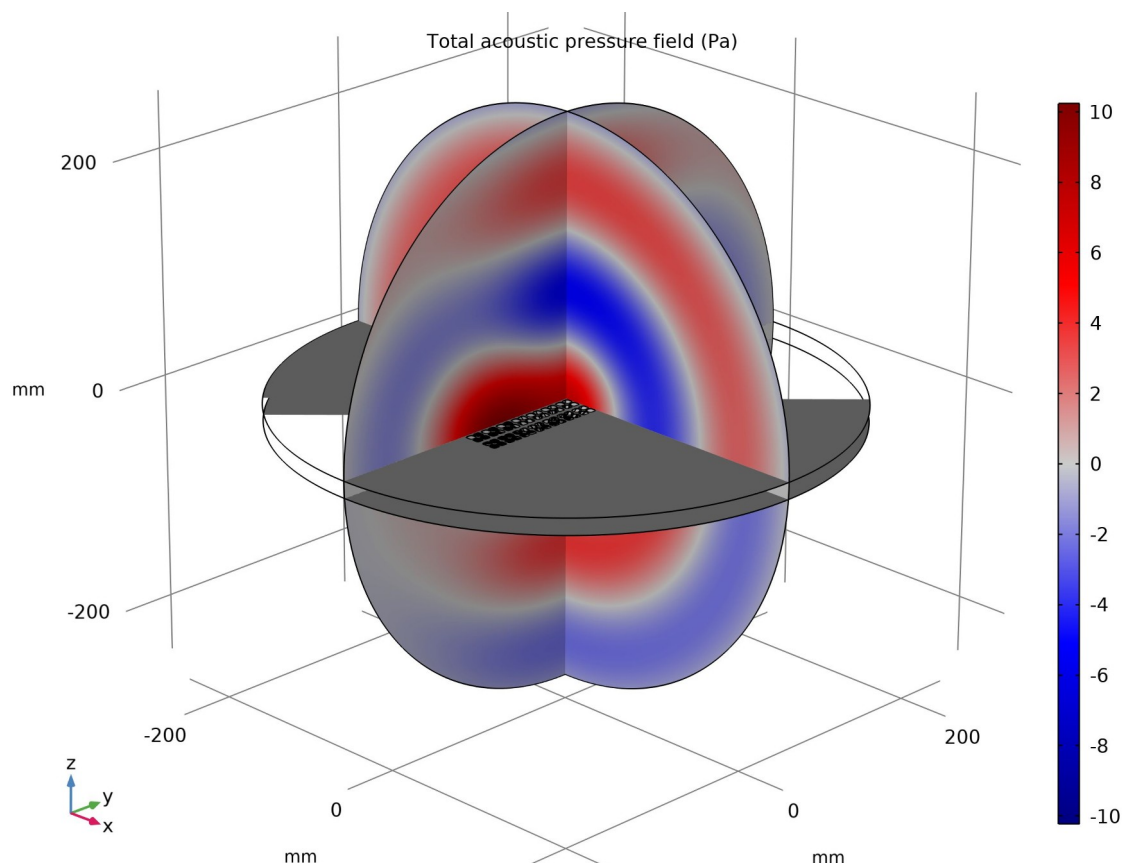
Przy wyborze metody obliczeniowej wzięto pod uwagę ograniczenia sprzętowe. Moduł rozwiązujący („solver”) bezpośredni wymaga znacznej ilości pamięci operacyjnej, większej niż była dostępna dla tej rozprawy. Aby ograniczyć zależność od pamięci RAM, wybrano iteracyjny, stacjonarny solver. Aby uzyskać dokładne wyniki, tolerancja względna została ustawiona na 0,001. Solver był "w pełni sprzężony", co oznacza rozwiązywanie dla wszystkich zmiennych w tym samym czasie, aż do osiągnięcia zbieżności. Wybrany solverem był "GMRES z GMG", który wykorzystuje uogólniony minimalny iteracyjny solver rezydualny z geometrycznym wielosiatkowym kondycjonerem wstępnym. Ta metoda jest zwykle szybsza niż solver bezpośredni i zużywa mniej pamięci w przypadku dużych modeli 3D.

Rozdział 4.

Wyniki symulacji

4.1. Prezentacja danych

Obliczenia wykonano dla częstotliwości: 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20 [kHz], co daje przestrzenny rozkład ciśnienia akustycznego w określonej sferze (Rysunek 4.1). Wyniki przedstawiono w płaszczyźnie z-x (promieniowanie 'poziome' krótszego boku soczewki) oraz w płaszczyźnie z-y (promieniowanie 'pionowe' dłuższego boku soczewki). Na każdej powierzchni górne półkole ($z > 0$ mm) zawiera rozkład ciśnienia akustycznego dla głośnika z soczewką, dolne półkole ($z < -15$ mm) zawiera rozkład ciśnienia dla głośnika bez soczewki. W kolejnych etapach pracy należy wykonać pomiary, które ze względu na między innymi ramy czasowe, będą wykonywane na płaszczyznach wyznaczających symetrię źródła. Wyniki symulacji zawarte są w całej objętości przestrzeni, w której były wykonywane obliczenia, prezentację ograniczono do wyników znajdujących się tylko na tych płaszczyznach, w celu późniejszego porównania z danymi pomiarowymi.



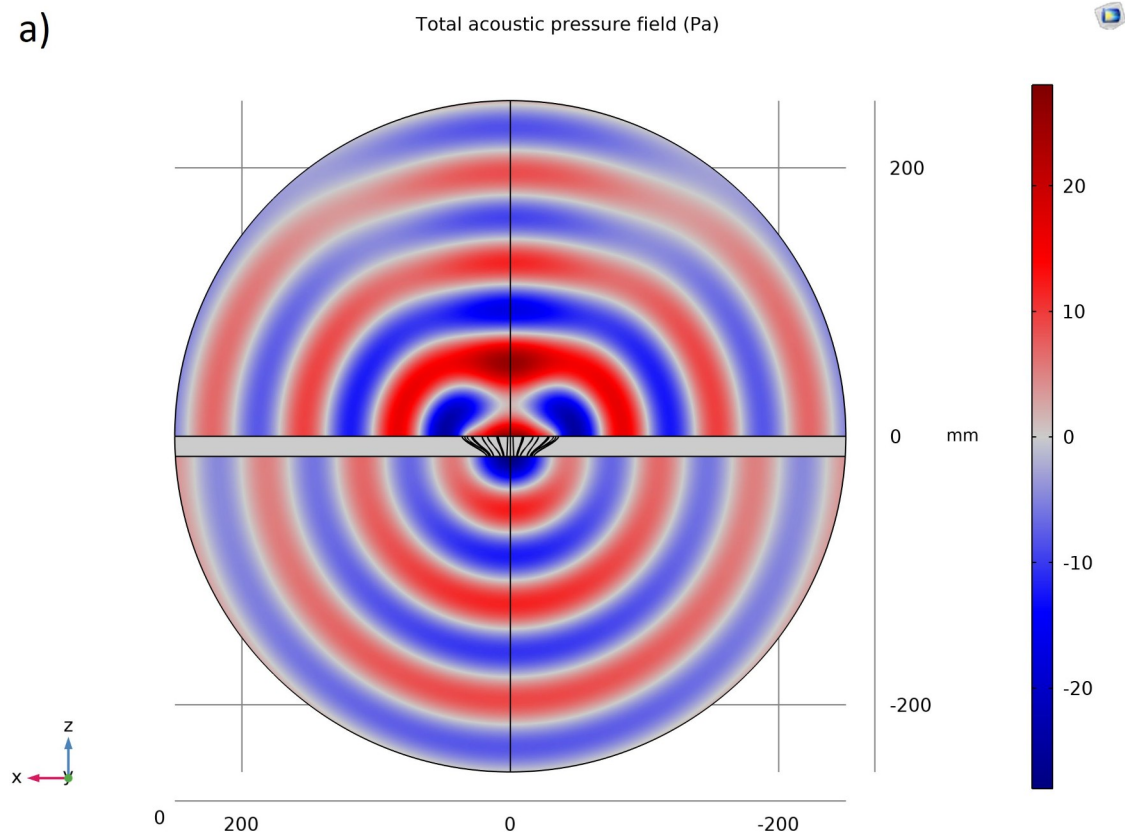
Rysunek 4.1 Pole wypadkowego ciśnienia akustycznego, przestrzenne rozmieszczenie wyników

4.2. Pole akustyczne

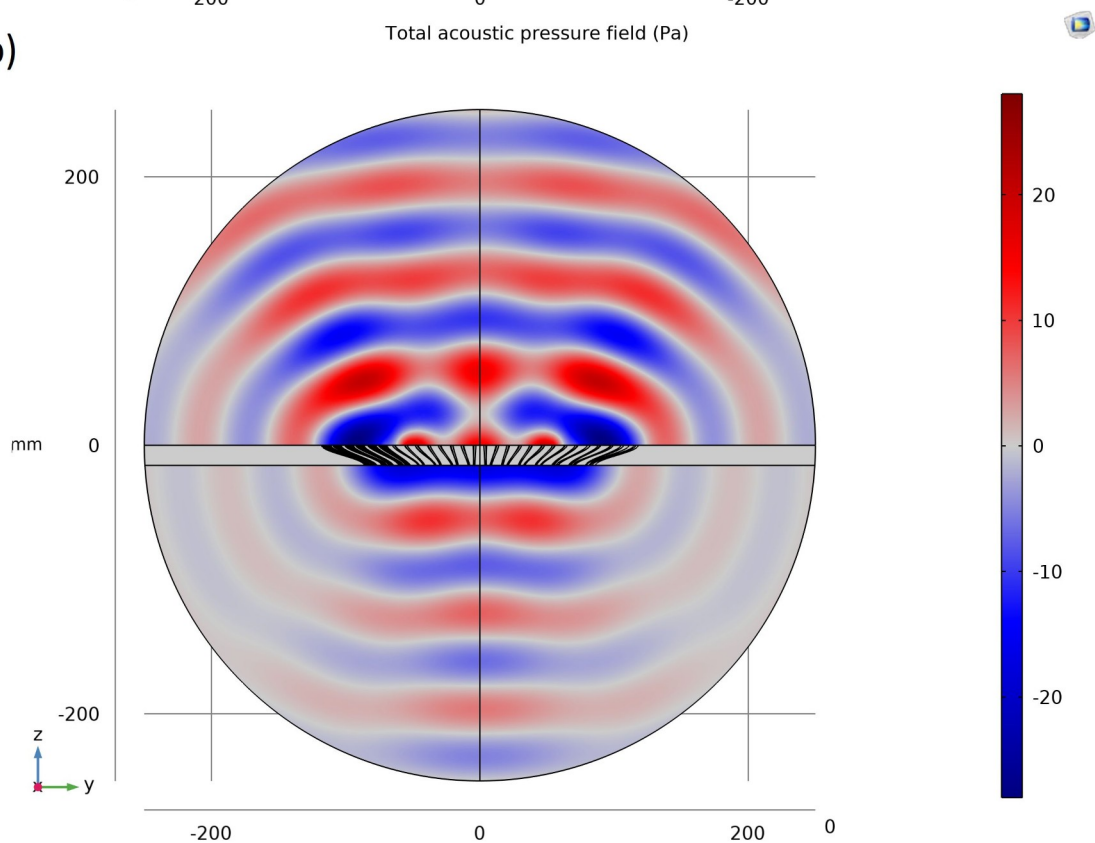
Ze względów praktycznych w niniejszym rozdziale skupiono się na dużych częstotliwościach, które wyraźnie obrazują wpływ badanej soczewki. Małe częstotliwości są promieniowane niemal dookoła, gdy długość fali jest znacząco większa niż wymiar źródła. Drugim powodem są trudności w obserwacji frontu falowego, gdy w obszarze obliczeniowym nie mieści się wielokrotność długości fali.

Rysunki 4.2 – 4.6 przedstawiają pole ciśnienia akustycznego w przestrzeni, kolor biały ($Pa = 0$) przedstawia ‘węzły’ frontu falowego, obserwując te krzywe można porównać kształt czoła fali dla samego przetwornika (dolna półsfera) i soczewki (górna półsfera). Nawet dla najmniej korzystnego z prezentowanych przypadków, gdzie długość fali jest porównywalna z krótszym wymiarem źródła (Rysunek 4.2 a) widoczne jest skuteczne działanie soczewki. Rozpatrując wszystkie przypadki promieniowania w płaszczyźnie poziomej, soczewka wpływa na zmniejszenie promienia krzywizny frontu falowego. Dla wszystkich przypadków promieniowania w płaszczyźnie pionowej soczewka przekształca płaskie czoło fali na ‘wypukłe’, charakteryzujące się promieniem krzywizny.

a)

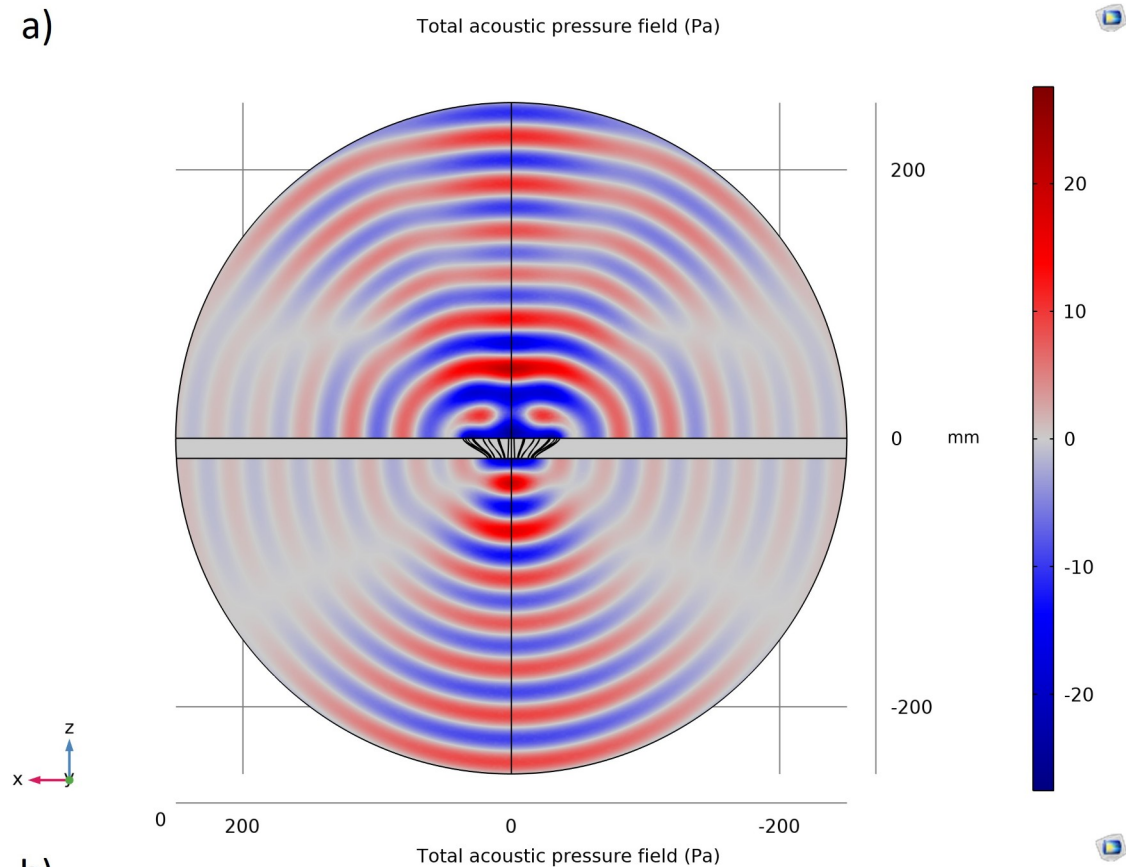


b)

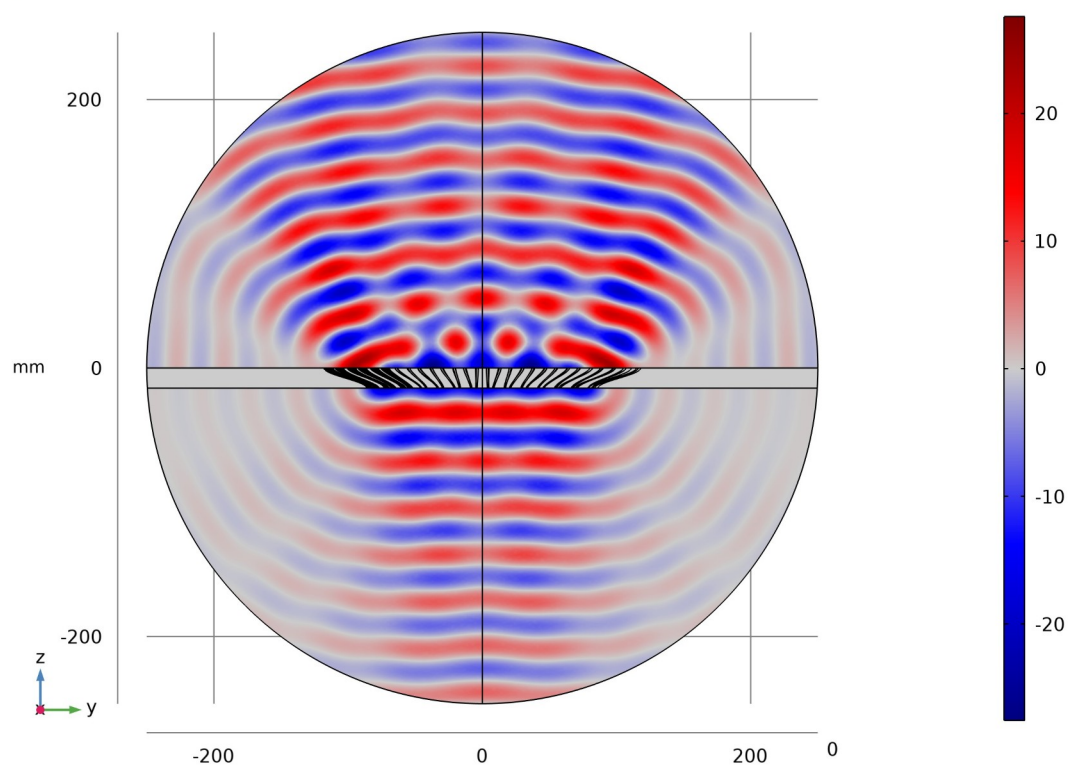


Rysunek 4.2 Wynik symulacji rozkładu ciśnienia akustycznego, $f = 5$ kHz, a) promieniowanie 'poziome' (wzdłuż krótszego wymiaru), b) pionowe (wzdłuż dłuższego wymiaru)

a)

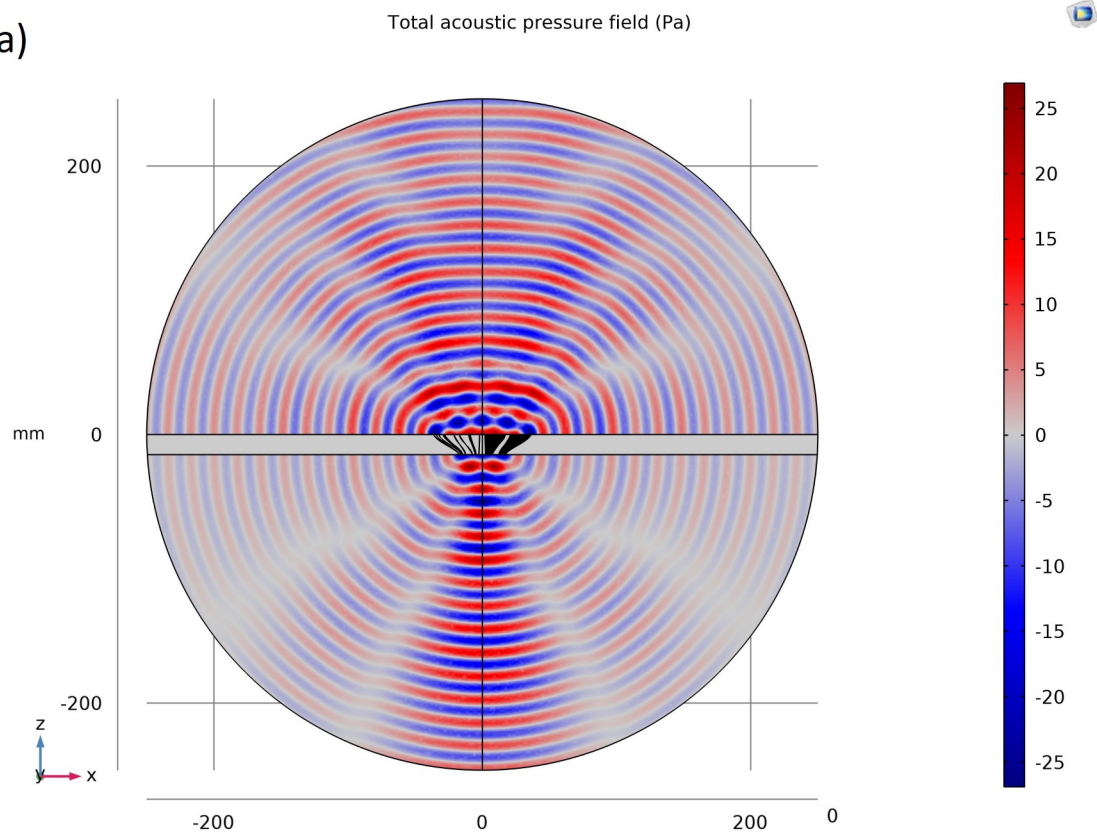


b)

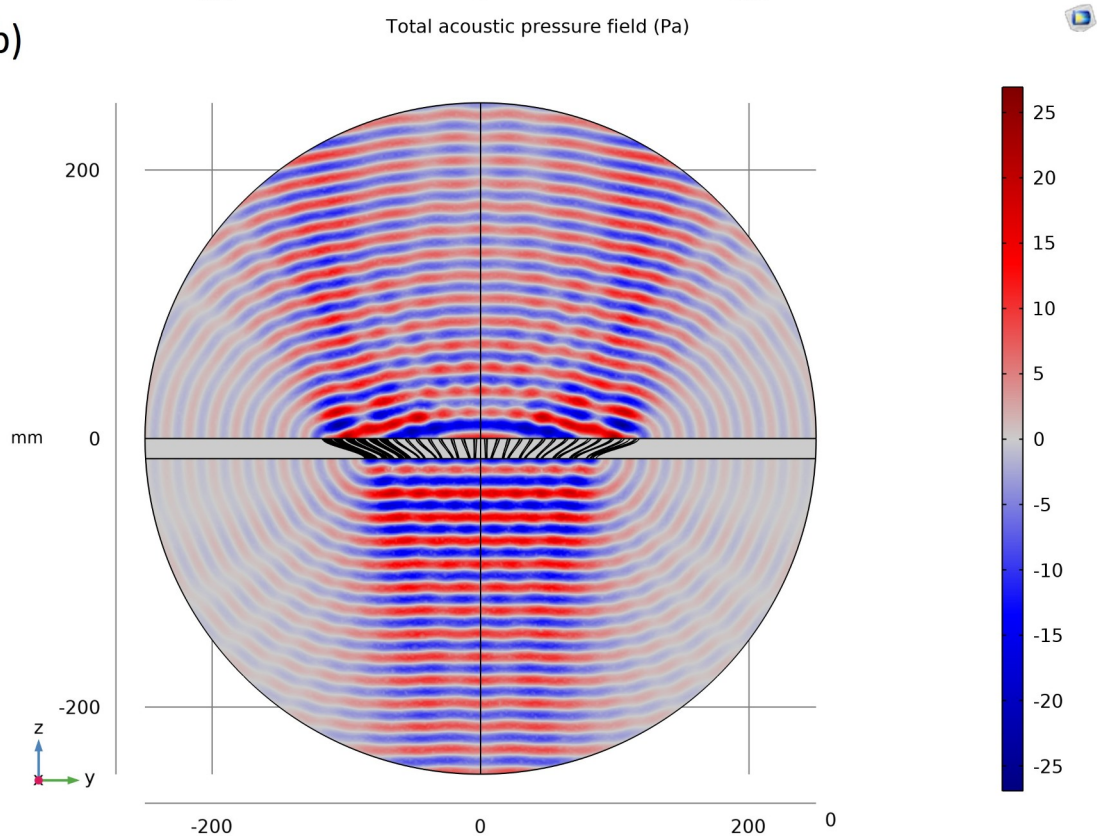


Rysunek 4.3 Wynik symulacji rozkładu ciśnienia akustycznego, $f = 10$ kHz, a) promieniowanie 'poziome' (wzdłuż krótszego wymiaru), b) pionowe (wzdłuż dłuższego wymiaru)

a)



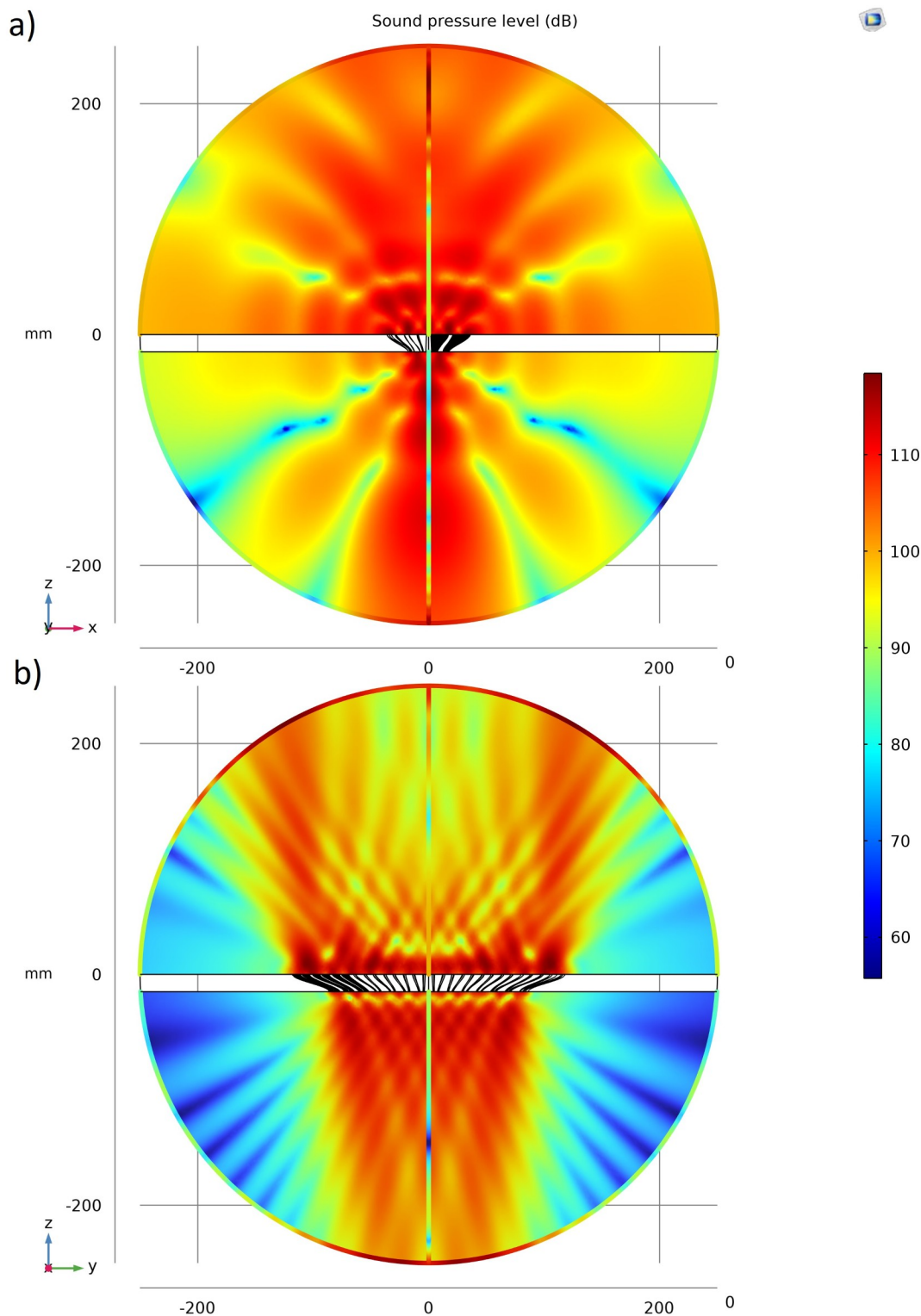
b)



Rysunek 4.4 Wynik symulacji rozkładu ciśnienia akustycznego, $f = 20$ kHz, a) promieniowanie 'poziome' (wzdłuż krótszego wymiaru), b) pionowe (wzdłuż dłuższego wymiaru)

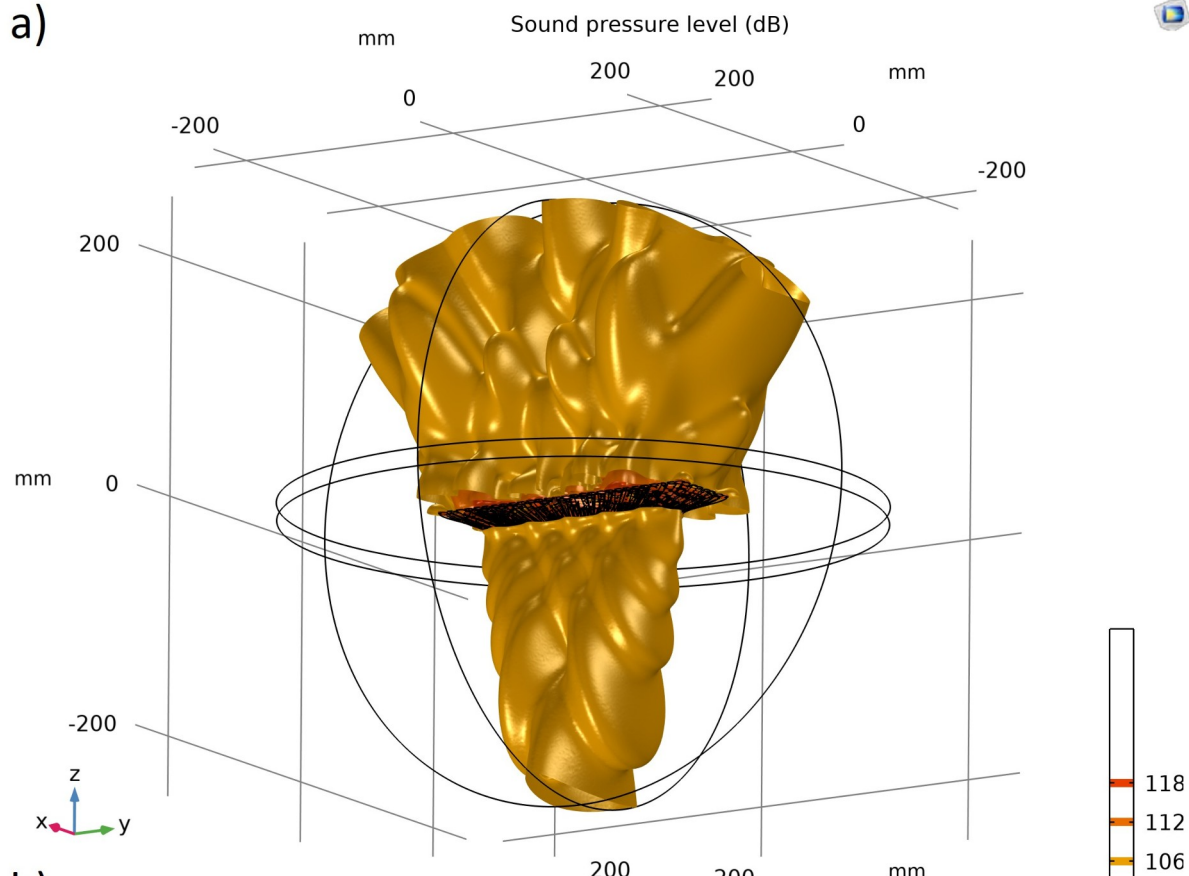
4.3. Poziom ciśnienia akustycznego

Możliwość odczytania poziomu ciśnienia akustycznego z Rysunków 4.2-4.4 za pomocą intensywności kolorów istnieje, jednak jest orientacyjna i trudna do zaobserwowania.

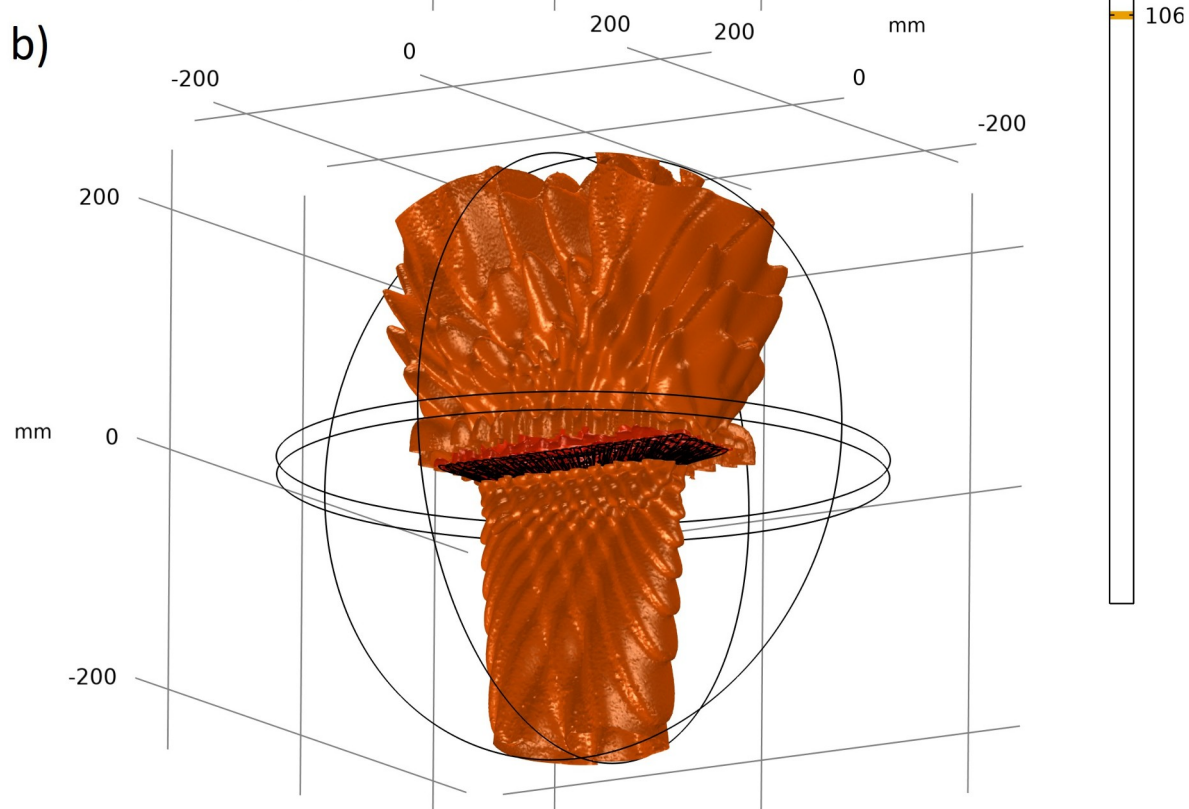


Rysunek 4.5 Wynik symulacji rozkładu poziomu ciśnienia akustycznego, $f = 20$ kHz, a) promieniowanie 'poziome' (wzdłuż krótszego wymiaru), b) pionowe (wzdłuż dłuższego wymiaru)

a)



b)



Rysunek 4.6 Wynik symulacji rozkładu poziomu ciśnienia akustycznego w postaci trójwymiarowej 'charakterystyki balonowej', a) $f = 10$ kHz, b) $f = 20$ kHz

Rysunek 4.5 przedstawia rozkład poziomu ciśnienia akustycznego, z którego nie można odczytać żadnych informacji na temat kształtu frontu falowego. Wykresy ciśnienia akustycznego i poziomu ciśnienia akustycznego się uzupełniają. Na tych pierwszych

(Rysunek 4.2 – 4.4) można zaobserwować zachowanie i kształt czoła fali w polu akustycznym, drugie prezentują nierównomierności w rozkładzie poziomu ciśnienia akustycznego (Rysunek 4.5). Interferencje wynikające z superpozycji ciśnienia akustycznego pochodzącego z różnych komórek przetwornika lub soczewki są wyraźnie widoczne w całym polu akustycznym.

Większość prezentowanych wyników skupia się na płaszczyznach stanowiących osie symetrii, aby było możliwe porównanie z wynikami pomiarów. Wyniki symulacji zawierają nieporównywalnie większą ilość danych w całej objętości dla której przeprowadzono obliczenia. Żeby pokazać działanie soczewki oraz samego przetwornika w trójwymiarowej przestrzeni, wygenerowano charakterystyki „balonowe” (Rysunek 4.6). Zostały wykreślone poprzez wyznaczenie powierzchni o jednakowym poziomie ciśnienia akustycznego w przestrzeni, pokazują kształt ‘prążków’ interferencyjnych jako trójwymiarowe bryły. Taki sposób prezentacji pozwala zobaczyć kształt ‘listków’ decydujących o kierunkowości źródła.

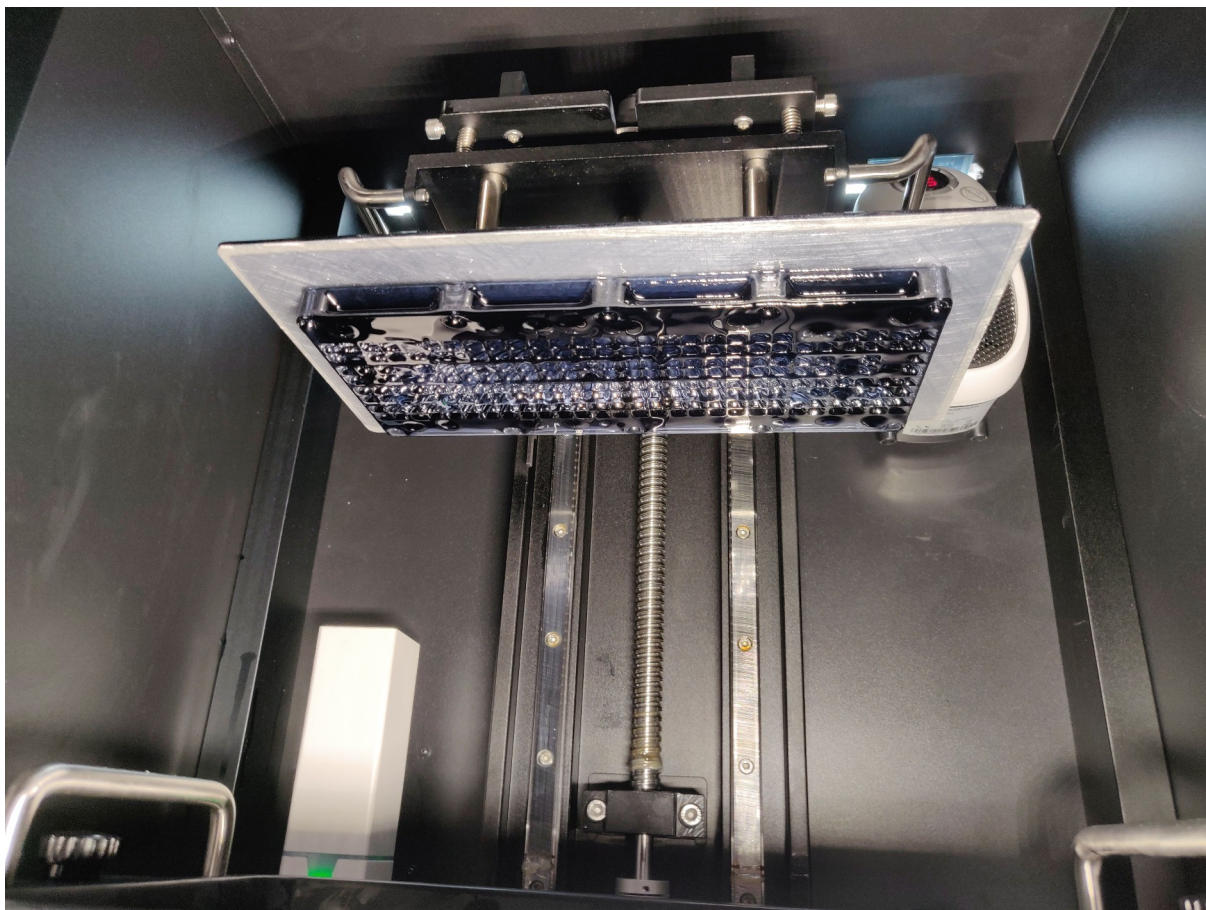
Rozdział 5.

Przygotowanie pomiarów

5.1. Wydruk soczewki

Ze względu na stopień skomplikowania proponowanej struktury, do wykonania prototypowej próbki wykorzystano metodę druku przestrzennego „mSLA” (masked stereolithography apparatus) z uwzględnieniem skurczu materiału. Mieszanka żywic światłoutwardzalnych została wstępnie zbadana pod kątem stabilności geometrycznej, wydruk testowy wykazał się objętościowym skurczem względnym na poziomie 3,9 %. Charakter tego skurczu jak i pozostałych właściwości materiałowych jest izotropowy, w przeciwieństwie do innych metod, np FFF (fused filament fabrication).

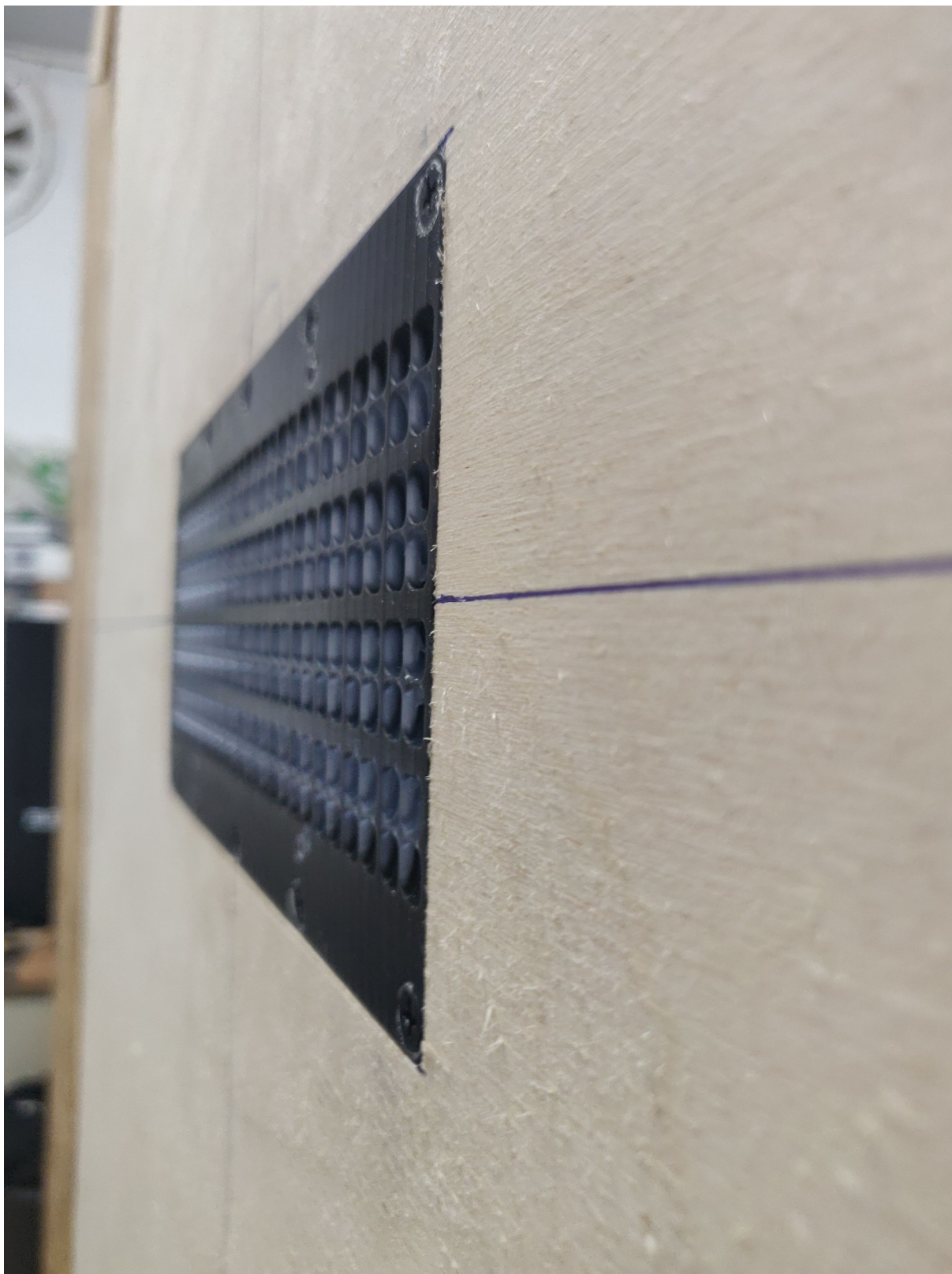
Urządzenie wykorzystane do wszystkich wydruków to „Elegoo Jupiter”, wyposażone w ekran monochromatyczny o przekątnej 12,8 cala i rozdzielczości 5448 (x) na 3064 (y) pikseli, rozmiarach objętości roboczej: 277,848 mm (x) na 156,264 mm (y) na 300,000 mm (z). Drukarkę cechuje zamknięta komora robocza, która została zmodyfikowana poprzez dodanie ogrzewania z wentylacją, sterowane termostatem, co pozwoliło na utrzymanie relatywnie stałej temperatury bliskiej 36° C. Stabilna, podwyższona temperatura pozwoliła na zmniejszenie lepkości nieutwardzonej żywicy, zwiększając prawdopodobieństwo bezproblemowego wydruku.



Rysunek 5.1 Prototypowa soczewka w trakcie wydruku

Model przestrzenny użyty w symulacji został przygotowany do wydruku z uwzględnieniem skurczu materiału, ograniczeń wynikających z zastosowanej metody oraz właściwości technicznych stosowanej drukarki 3D. Ekran w urządzeniu drukującym był wyposażony w ekran o rozmiarach piksela równych 0,051 mm na 0,051 mm, tyle samo wynosiła również wysokość każdej naświetlanej warstwy. Zamiast dyskretnego sterowania transparentnością poszczególnych pikseli zastosowano 'anti-aliasing', czyli algorytm ograniczający efekt 'schodkowania' krzywizn w wydruku, poprawiając odwzorowanie geometrii modelu. Za dokładność odzwierciedlenia modelu rzeczywistego można przyjąć wartość trójwymiarowego piksela („voxel”) o wymiarach 0,051 mm x 0,051 mm x 0,051 mm. Rozdzielczość wydruku znacząco przewyższała rozdzielczość przestrzenną siatki użytej w symulacji (3,4 mm).

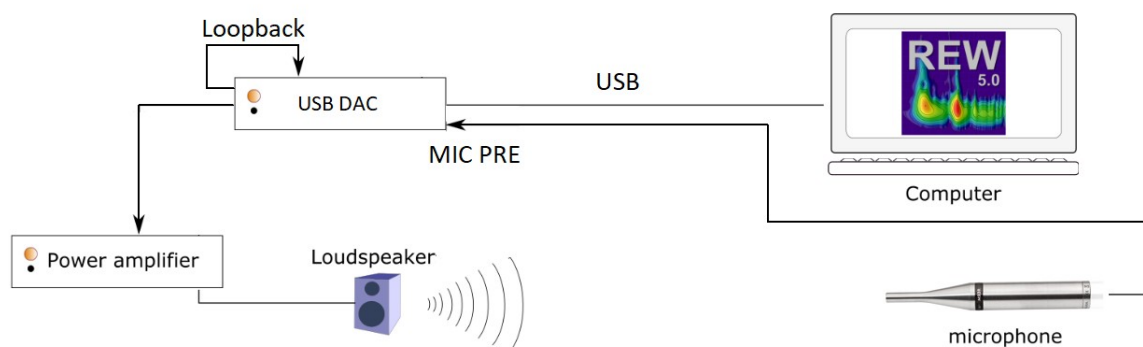
Wydrukowana struktura została przygotowana w sposób umożliwiający montaż w przegrodzie pomiarowej, aby powierzchnia wylotu soczewki znajdowała się w jednej płaszczyźnie z powierzchnią odgrody, bez nieciągłości (Rysunek 5.2). Aby umożliwić pomiary przetwornika bez struktury, wydrukowano adapter pozwalający na zamontowanie samego głośnika w identyczny sposób.



Rysunek 5.2 Montaż wydrukowanej struktury w przegrodzie pomiarowej

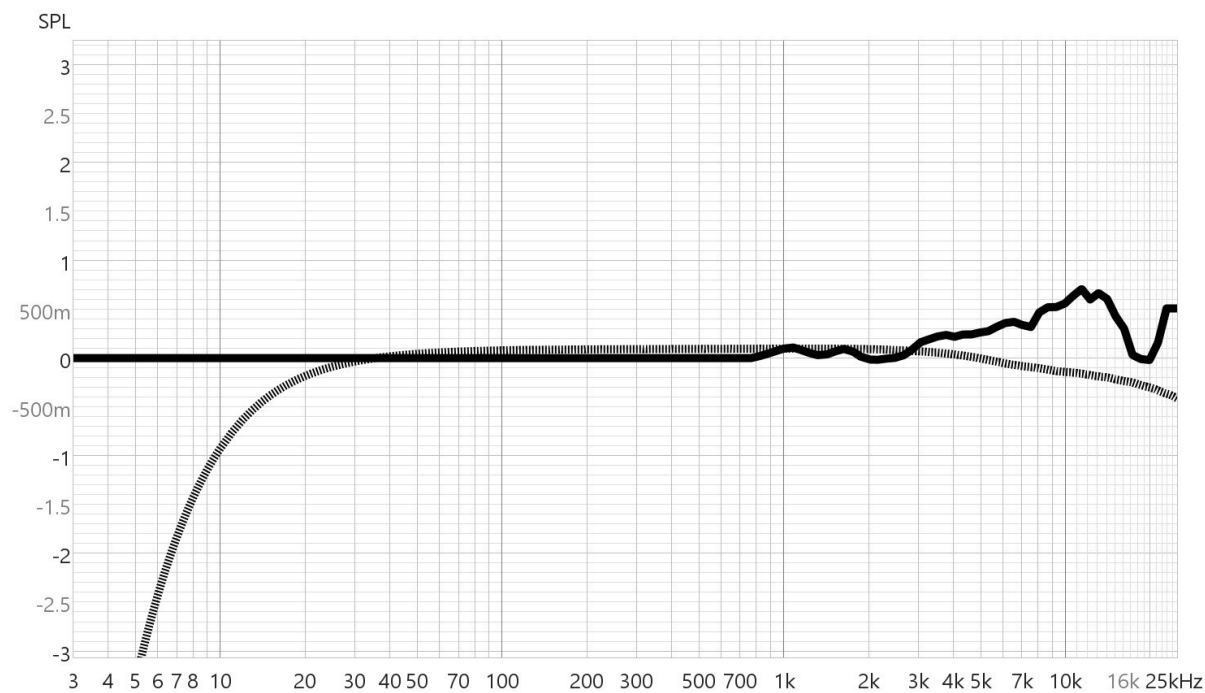
5.2. Układ pomiarowy

Do wszystkich pomiarów wykorzystano skalibrowany mikrofon pomiarowy „Earthworks M23R” o rozmiarze kapsuły równej 1/4”, nierównomierności pasma przenoszenia nie większej niż 0,5 dB w paśmie 3 Hz – 23 kHz, co spełnia wymogi dotyczące mikrofonów klasy pierwszej [11]. Jako przedwzmacniacz mikrofonowy wraz z zasilaniem „phantom” użyto interfejsu USB „MOTU UltraLite MK5” który również pełnił rolę przetwornika analogowo-cyfrowego oraz cyfrowo-analogowego. Częstotliwość próbkowania interfejsu odpowiadającego za przetwarzanie analogowo – cyfrowe wynosiła 192 kHz. Do zasilania przetwornika użyto wzmacniacza „Powersoft MEZZO 604A”, w którym wyłączono DSP. Napięcie sygnału pomiarowego na zaciskach przetwornika wynosiło 2 V dla wszystkich serii pomiarów oprócz mierzących spadek poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji odległości, gdzie zastosowano napięcie równe 1.41 V, aby uniknąć przesterowania mikrofonu przy najmniejszych odległościach od przetwornika/struktury. Dodatkowe wejście i wyjście interfejsu zostało programowo połączone, tworząc pętlę sygnału referencyjnego („loopback”), wszystkie połączenia pomiędzy urządzeniami są widoczne na rysunku 5.3.



Rysunek 5.3 Schemat połączeń w układzie pomiarowym

Mikrofon pomiarowy został dostarczony z plikiem kalibracyjnym, który wprowadza korekty występującej w specyfikacji nierównomierności pasma przenoszenia (Rysunek 5.4). Aby wyeliminować wpływ przedwzmacniacza mikrofonowego oraz przetwornika cyfrowo-analogowego interfejsu, przeprowadzono kalibrację układu pomiarowego poprzez ich połączenie i pomiar, na podstawie którego wygenerowano korektę (Rysunek 5.4).



Rysunek 5.4 Przebiegi poprawki (kalibracji) dla mikrofonu pomiarowego (linia ciągła) oraz interfejsu (linia przerywana)

Wartość poziomu ciśnienia akustycznego raportowanego przez oprogramowanie musiała zostać uwiarygodniona poprzez kalibrację całego układu pomiarowego za pomocą skalibrowanego pistonfonu „Larson Davis CAL200” o częstotliwości 1 kHz i poziomie ciśnienia akustycznego równego 93,99 dB (Rysunek 5.5).



Rysunek 5.5 Kalibracja układu pomiarowego

Aby pozycjonować mikrofon w przestrzeni przed przegrodą pomiarową wykorzystano płaszczyznę z nadrukowanym 'kątomierzem', usytuowaną pod przegrodą i wyznaczającą oś symetrii zamontowanego przetwornika/struktury oraz podział kątowy poza osią (rysunek 5.6). Pozycja mikrofonu była ustalana poprzez umieszczanie statywu na liniach wyznaczających poszczególne kąty oraz pomiar odległości kapsuły od geometrycznego środka struktury/przetwornika. Dokładność pozycjonowania mikrofonu powinna mieścić się w wartości 1° dla kąta względem osi oraz 1 mm dla odległości od przegrody.



Rysunek 5.6 Przegroda pomiarowa z płaszczyzną ustalającą pozycję mikrofonu

5.3. Serie pomiarowe

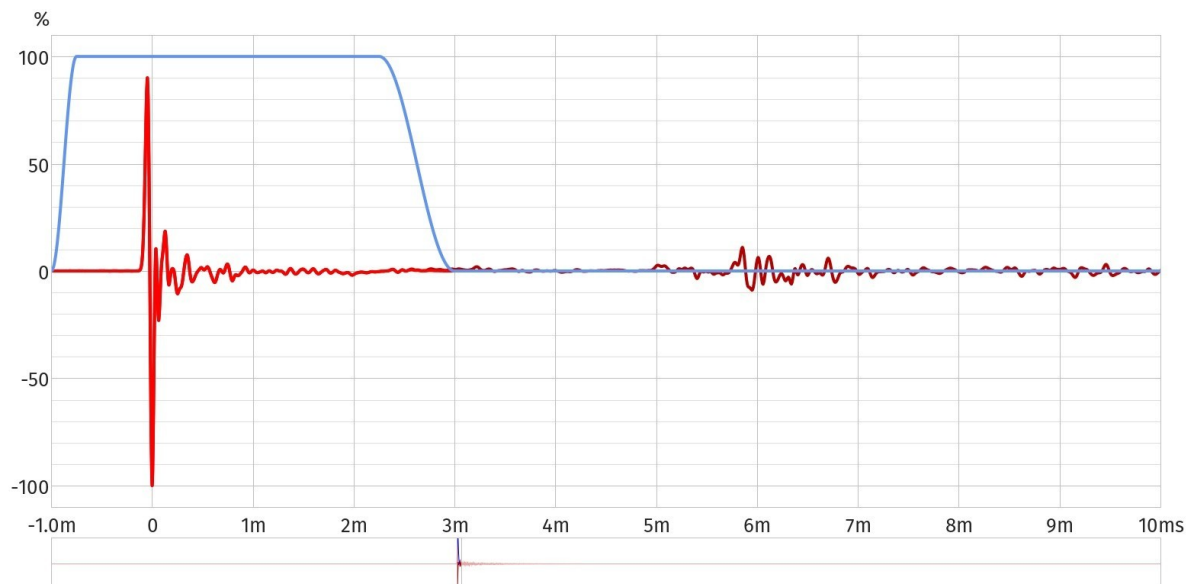
Żeby zbadać wpływ obecności soczewki, pomiary odpowiedzi amplitudowej zostały podzielone na serie wyszczególnione w tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Serie pomiarowe

Ilość pomiarów	Pole bliskie, $r = 250$ mm; kąt od 0° do 90° ; $V = 2$ V	Pole dalekie, $r = 1000$ mm; kąt od 0° do 90° ; $V = 2$ V	Odległość od 63 mm do 2 m; kąt 0° ; $V = 1.41$ V
Przetwornik bez soczewki, płaszczyzna mniejszego wymiaru ('pozioma')	19	19	12
Przetwornik bez soczewki, płaszczyzna większego wymiaru, ('pionowa')	19	19	12
Przetwornik z soczewką, płaszczyzna mniejszego wymiaru ('pozioma')	19	19	12
Przetwornik z soczewką, płaszczyzna większego wymiaru, ('pionowa')	19	19	12
		Suma ilości pomiarów:	200

5.4. Warunki pomiarowe

Badana przegroda z centralnie umieszczoną strukturą/przetwornikiem była umieszczona tak, aby zapewnić odległość od środka geometrycznego do powierzchni odbijających co najmniej 2 m. Wyniki pomiarów były uwzględniane wewnątrz okna czasowego, którego długość była dobierana na podstawie zmierzonych odpowiedzi impulsowych. Stosowano maksymalną szerokość okna które nie będzie zawierało pierwszego odbicia od najbliższej powierzchni pomieszczenia pomiarowego (Rysunek 5.7).



Rysunek 5.7 Przebieg odpowiedzi impulsowej jednego z pomiarów

Dla zaprezentowanego przykładu pierwsze odbicie dotarło do mikrofonu po około 5 ms po maksimum sygnału badanego. Okno czasowe zostało ustawione od -1 ms do 3 ms. Długość tego okna pozwalała na analizę wyników z dolną graniczą częstotliwością równą 340 Hz, przyjmując prędkość propagacji fali akustycznej w powietrzu za 340 m/s. Zastosowana metoda nosi nazwę „symulowanego pola swobodnego” [21].

Rozdział 6.

Wyniki pomiarów

6.1. Pole bliskie

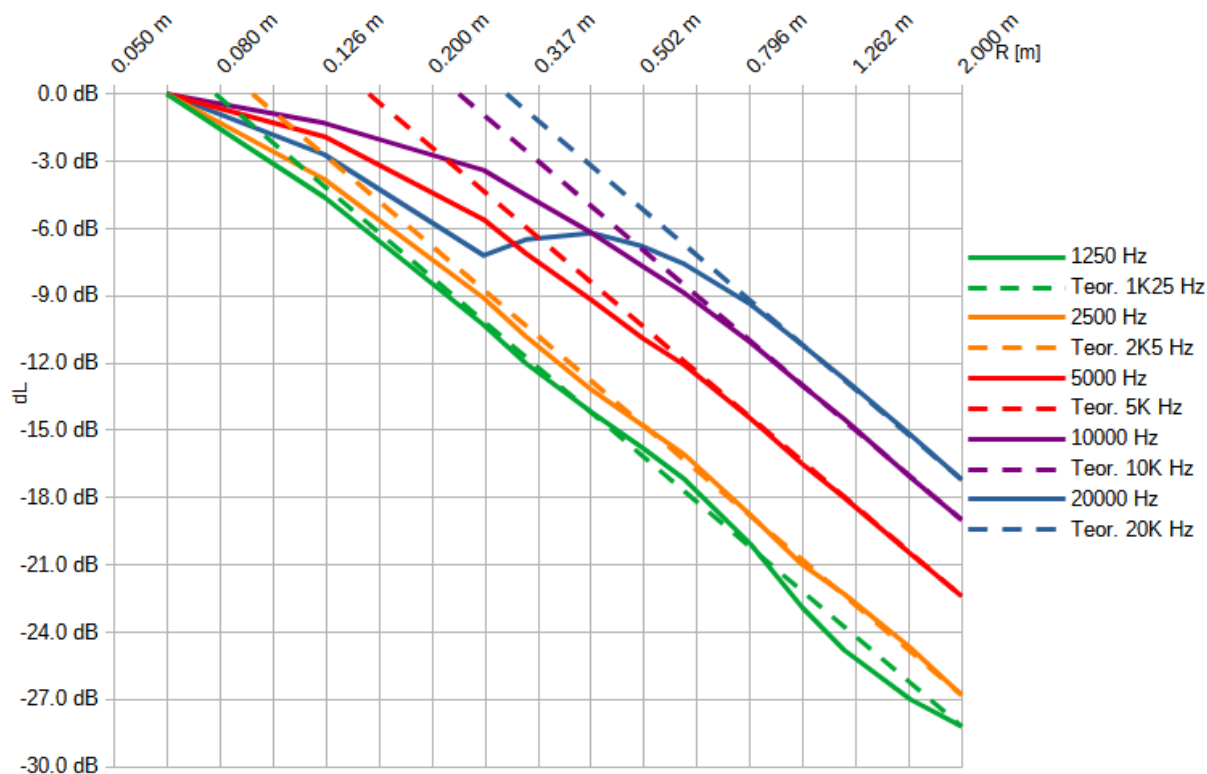
Rozkład poziomu ciśnienia akustycznego w przestrzeni jest silnie uzależniony od odległości od źródła. Pole może być podzielone na dwie strefy: pole bliskie oraz dalekie. Położenie granicy między tymi obszarami uzależnione jest od rozmiarów źródła oraz długości fali. Jedną z charakterystycznych cech pola dalekiego jest spadek poziomu ciśnienia akustycznego zgodny z prawem odwrotnego kwadratu, czyli spadkiem o 6 dB na podwojenie odległości.

$$\begin{aligned}\Delta L &= L_{p2} - L_{p1} \\ &= 20 \log(r_2/r_1)\end{aligned}\tag{6.1}$$

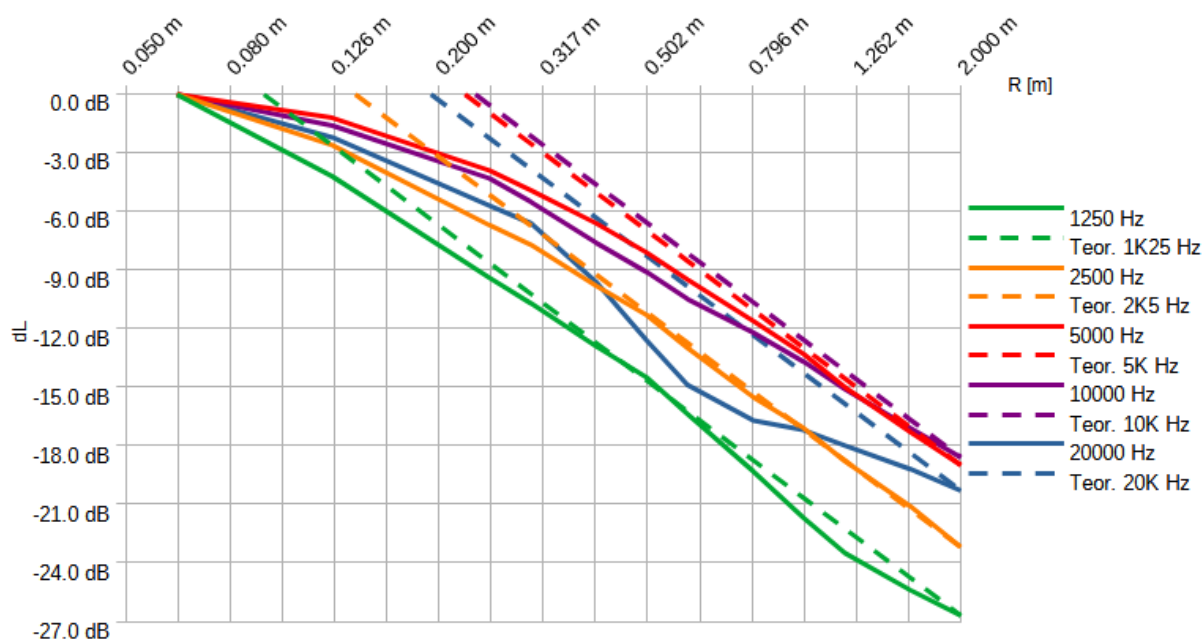
gdzie ΔL to różnica poziomów ciśnienia akustycznego,
 L_{p1} , L_{p2} to poziomy ciśnienia akustycznego położeniu pierwszym i drugim,
 r_1 , r_2 to odległości od źródła w położeniach pierwszym i drugim

Aby zaobserwować rzeczywisty spadek poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji odległości, przeprowadzono dodatkową serię pomiarów w warunkach opisanych w rozdziale piątym. Mikrofon pomiarowy zmieniał położenie wzdłuż osi symetrii przetwornika lub wylotu soczewki. W obu przypadkach przeprowadzono pomiary przy stałym napięciu, dla różnych odległości od źródła, w zakresie 63 mm – 2 m. Pośrednie odległości były dobierane tak, aby były swoimi całkowitymi wielokrotnościami. Dla każdej z pozycji zapisano wartości poziomu ciśnienia akustycznego dla częstotliwości użytych w symulacjach. Wyniki zostały zaprezentowane jako wartości spadku poziomu ciśnienia

akustycznego w funkcji odległości względem poziomu w pierwszej pozycji, który został przyjęty jako 0 dB. Żeby wykresy z wynikami zachowały czytelność, wybrano wyniki co oktawę, w zakresie 1250 Hz – 20 kHz. Dla każdej krzywej wykreślono linie ‘teoretyczne’ czyli mające nachylenie wynikające ze wzoru (6.1) i równe co do wartości odpowiadającym krzywym zmierzonym w maksymalnej odległości. Prezentację danych wykonano dla pomiarów bez soczewki (Rysunek 6.1) oraz z soczewką (Rysunek 6.2).



Rysunek 6.1 Poziom ciśnienia akustycznego w funkcji odległości, przetwornik bez soczewki



Rysunek 6.2 Poziom ciśnienia akustycznego w funkcji odległości, przetwornik z soczewką

Dla źródła o kształcie prostokątnym, który występuje w obu omawianych przypadkach można wyznaczyć teoretyczną odległość granicy pola bliskiego [9, 20]. Dla płaskiego przetwornika o długościach boków a oraz b , przy założeniu że $a < b$, długość pola bliskiego l_0 można wyznaczyć za pomocą wzoru (6.2).

$$l_0 = \frac{a^2 + b^2}{\pi \lambda} \left(1 - \frac{a}{2b} \right) \quad (6.2)$$

Obliczone teoretyczne wartości długości pola bliskiego zostały zestawione w tabeli 5. Przy określonych wymiarach źródła wartość l_0 jest wprost proporcjonalna do częstotliwości. Dla przetwornika z soczewką, ze względu na powiększone rozmiary wylotu soczewki względem rozmiarów powierzchni membrany, granica pola bliskiego znajduje się niemal w dwukrotnie większej odległości niż w przypadku samego głośnika, dla każdej z rozpatrywanych częstotliwości. Jeśli przyjąć kryterium pola dalekiego jako spadek poziomu ciśnienia akustycznego o 6 dB na podwojenie odległości od źródła, można z rysunków 20 oraz 21 odczytać przybliżone wartości długości pola bliskiego w punktach gdzie krzywe pomiarowe stają się równoległe do wyznaczonych linii 'teoretycznych'.

Tabela 6.1 Obliczone oraz odczytane długości pola bliskiego

Rozmiar a	0,034 m	0,072 m		
Rozmiar b	0,173 m	0,238 m		
f [Hz]	l_0 bez soczewki, obliczone	l_0 z soczewką, obliczone	l_0 bez soczewki, odczytane	l_0 z soczewką, odczytane
1250	0,033 m	0,061 m	0,100	0,400
2500	0,066 m	0,123 m	0,250	0,500
5000	0,131 m	0,246 m	0,600	1,000
10000	0,262 m	0,491 m	0,800	2,000
20000	0,525 m	0,983 m	1,000	>2,000

Porównując wartości obliczone z odczytanymi (tabela 6.1) z kształtem krzywych wykreślonych na podstawie pomiarów (rysunek 6.1, 6.2) można zauważyć, że zmierzona długość pola bliskiego jest większa dla tych drugich. Jednym z powodów takiej rozbieżności może być fakt, że granica pola bliskiego nie jest dyskretna, występuje płynne przejście w pole dalekie. Według wartości obliczonych, wszystkie symulacje i pomiary w odległości $r = 250$ mm znajdują się w polu bliskim dla częstotliwości

większych niż 10 kHz w przypadku samego przetwornika, oraz 5 kHz w przypadku przetwornika z soczewką. Biorąc pod uwagę wartości odczytane, częstotliwości maleją do kolejno 2500 Hz oraz <1250 Hz.

6.2. Zysk kierunkowości

Jednym z uproszczonych sposobów opisu promieniowania źródła w przestrzeni jest współczynnik kierunkowości $Q(f)$. Według definicji [2] jego wartość jest stosunkiem natężenia dźwięku na wyznaczonej osi promieniowania w odległości R od źródła wypromieniowanej przez badane źródło do natężenia które, w tej samej pozycji, pochodziło by od źródła punktowego generującego ekwiwalentną całkowitą moc akustyczną. Pomiary wykonywane w polu swobodnym. Wyznaczona oś jest zazwyczaj kierunkiem maksymalnego natężenia, w tym przypadku wartość $Q(f)$ zawsze jest większa od jedności. W omawianym przypadku występuje przegroda, więc dotyczy promieniowania w półprzestrzeni. Wartości zmierzone reprezentują fragmenty powierzchni półsfery dS (6.3).

$$dS = r^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad (6.3)$$

gdzie θ jest kątem elewacji, a ϕ jest kątem azymutu we współrzędnych sferycznych.

Natężenie dźwięku I w punkcie odległym o r od źródła w polu swobodnym jest determinowane poprzez pomiar efektywnego ciśnienia akustycznego p_{rms} (6.4). Gdy źródło jest punktowe, całkowita moc wypromieniowana W_p jest wyrażona wzorem (6.5).

$$I = |p_{rms}|^2 / \rho_0 c \quad (6.4)$$

$$W_p = 4\pi r^2 I \quad (6.5)$$

Jeśli źródło nie jest źródłem punktowym, całkowita moc wypromieniowana jest sumą natężeń na powierzchni sfery o promieniu r (6.6).

$$W = \frac{r^2}{\rho_0 c} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi p_{rms}^2(\theta, \phi, r) \sin \theta d\theta d\phi \quad (6.6)$$

Znając poziom średniej kwadratowej ciśnienia akustycznego na wyznaczonej osi ($|\rho_{ax}|^2$) w odległości r od źródła, można obliczyć współczynnik kierunkowości (6.7).

$$Q(f) = \frac{|\rho_{ax}|^2}{\rho_0 c} \frac{4\pi r^2}{W} \quad (6.7)$$

Zysk kierunkowości $DI(f)$ jest inną formą prezentacji współczynnika kierunkowości. Jest dziesięciokrotnością logarytmu o podstawie 10 ze współczynnika kierunkowości (6.8).

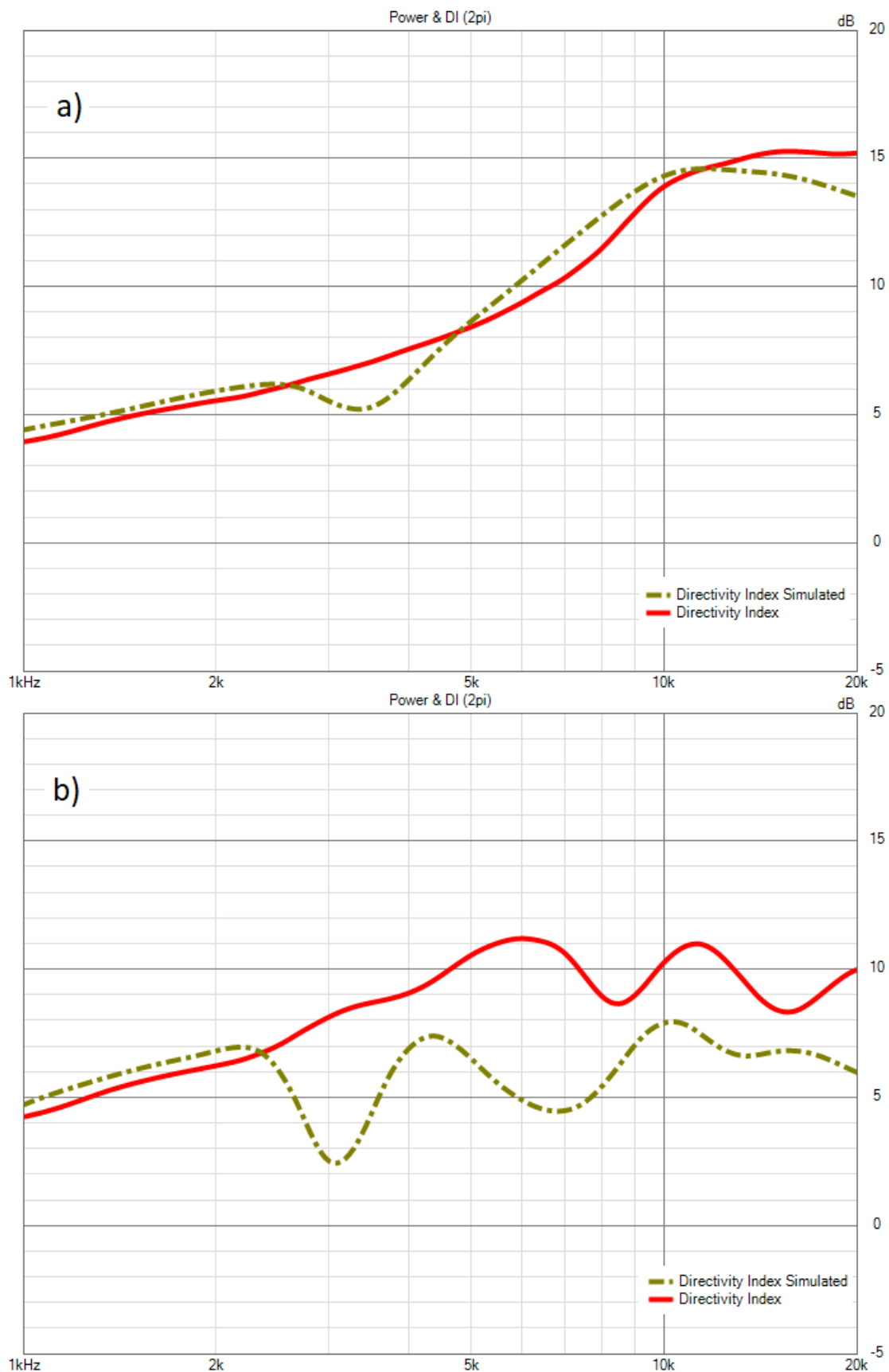
$$DI(f) = 10 \log_{10} Q(f) \quad (6.8)$$

Dla źródła o promieniowaniu osiowo-symetrycznym, w półprzestrzeni, można wyznaczyć zysk kierunkowości wykorzystując pomiary w płaszczyźnie poziomej. Skończona ilość pomiarów ciśnienia akustycznego z rozdzielczością kątową $\Delta\theta$ mieści się w tym przypadku w zakresie 0 do 90° (6.9).

$$DI(f) = 10 \log_{10} \frac{(2\pi \rho_{rms}^2(0))(180^\circ/\pi)}{2\pi \sum_{n=1}^{90^\circ/\Delta\theta} \rho_{rms}^2(\theta_n) \sin \theta_n \Delta\theta} \quad (6.9)$$

Zarówno przetwornik jak i wylot soczewki nie charakteryzują się kształtem figury obrotowej, ponieważ posiadają dwie osie symetrii. W omawianych przypadkach pomiary zostały wykonane z rozdzielczością kątową $\Delta\theta = 5^\circ$, zarówno w płaszczyźnie pionowej jak i poziomej, wzdłuż kolejno większego i mniejszego wymiaru źródła. Nie zakładano symetrycznego promieniowania, stąd θ oraz φ mieściły się w zakresie 0 do 180° . W taki sam sposób zostały odczytane dane z wyników symulacji z rozdziału czwartego. Brakujące wartości w przestrzeniach poza wspomnianymi płaszczyznami osi symetrii zostały interpolowane na podstawie danych z najbliższych punktów pomiarowych.

W odległości $r = 0,25$ m, co jest polem bliskim dla części zakresu badanych częstotliwości, wykreślono wykresy porównawcze zysku kierunkowości w funkcji częstotliwości. Celem tych porównań jest zaobserwowanie różnic pomiędzy danymi pomiarowymi a tymi uzyskanymi w symulacjach (Rysunek 6.3). Dane pomiarowe miały tę samą rozdzielczość przestrzenną jak dane z symulacji, jednak nieporównywalnie większą rozdzielczość częstotliwościową. Aby dopasować rozdzielczość pomiaru do symulacji, zmierzone poziomy dla każdego punktu pomiarowego zostały uśrednione w pasmach 1/3 oktawowych, o środkowych częstotliwościach odpowiadających częstotliwościom dla których zostały przeprowadzone symulacje.



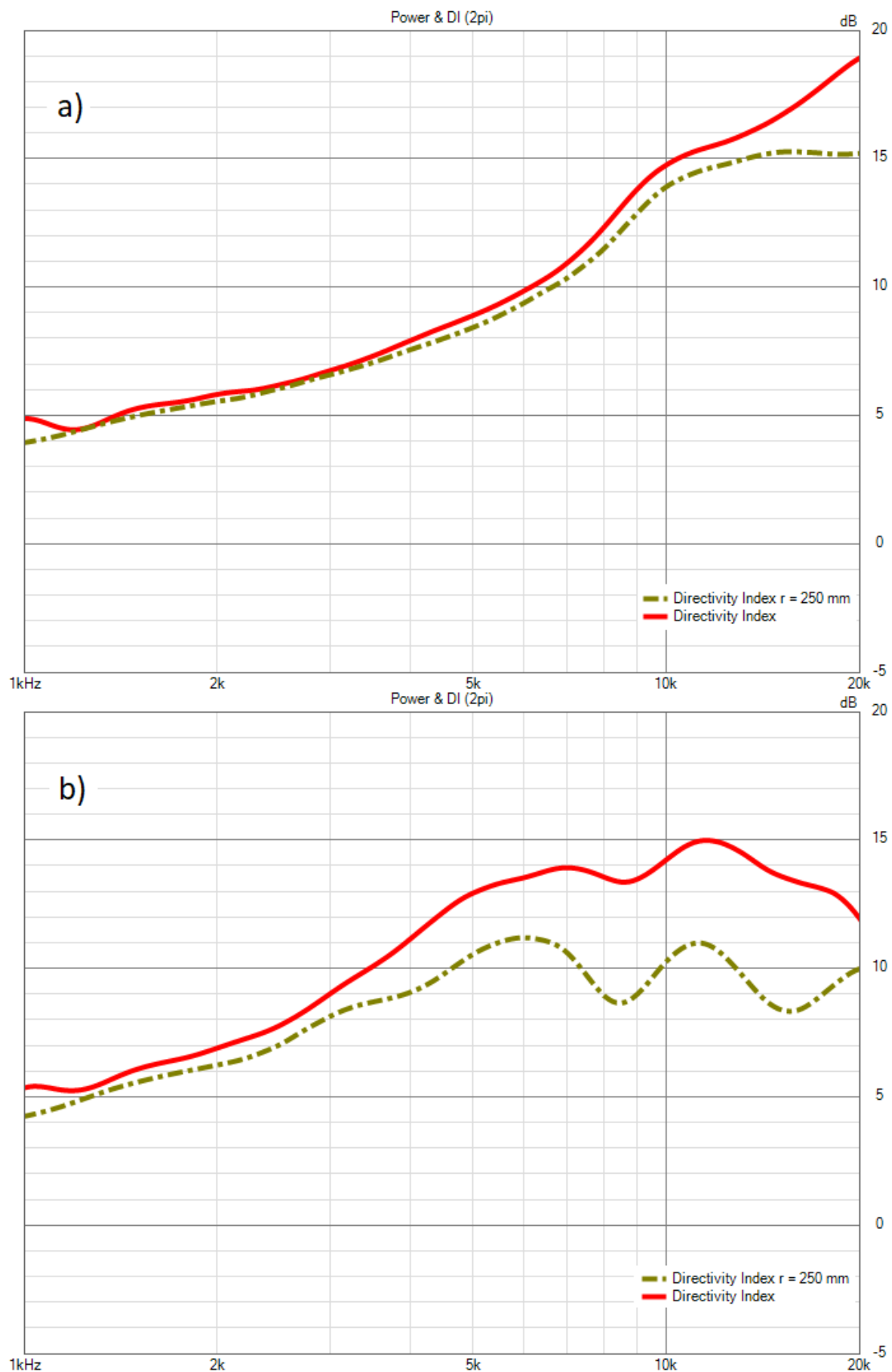
Rysunek 6.3 Zysk kierunkowości w funkcji częstotliwości, $r = 0,25$ m, linia czerwona ciągła – pomiar, linia oliwkowa przerywana – symulacja, a) przetwornik bez soczewki, b) przetwornik z soczewką

Analizując przebiegi porównujące zyski kierunkowości obliczone z symulacji i pomiarów, można zauważyć zadowalającą zgodność w przypadku przetwornika bez soczewki

(Rysunek 6.3 a), oraz znaczące różnice w przypadku z soczewką (Rysunek 6.3 b). Rozbieżności będą analizowane na podstawie rozkładów poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji kąta, w dalszej części rozprawy.

Mimo braku możliwości wykonania symulacji dla większych odległości od źródła, wykonano dodatkowe serie pomiarowe rozkładu poziomu ciśnienia akustycznego w przestrzeni dla odległości $r = 1$ m. Według obliczeń teoretycznych (tabela 6.1) w tej odległości występuje pole dalekie dla przetwornika z soczewką i bez, dla całego badanego zakresu częstotliwości. Wykreślono wykresy porównawcze pomiarów w polu bliskim i dalekim (Rysunek 6.4).

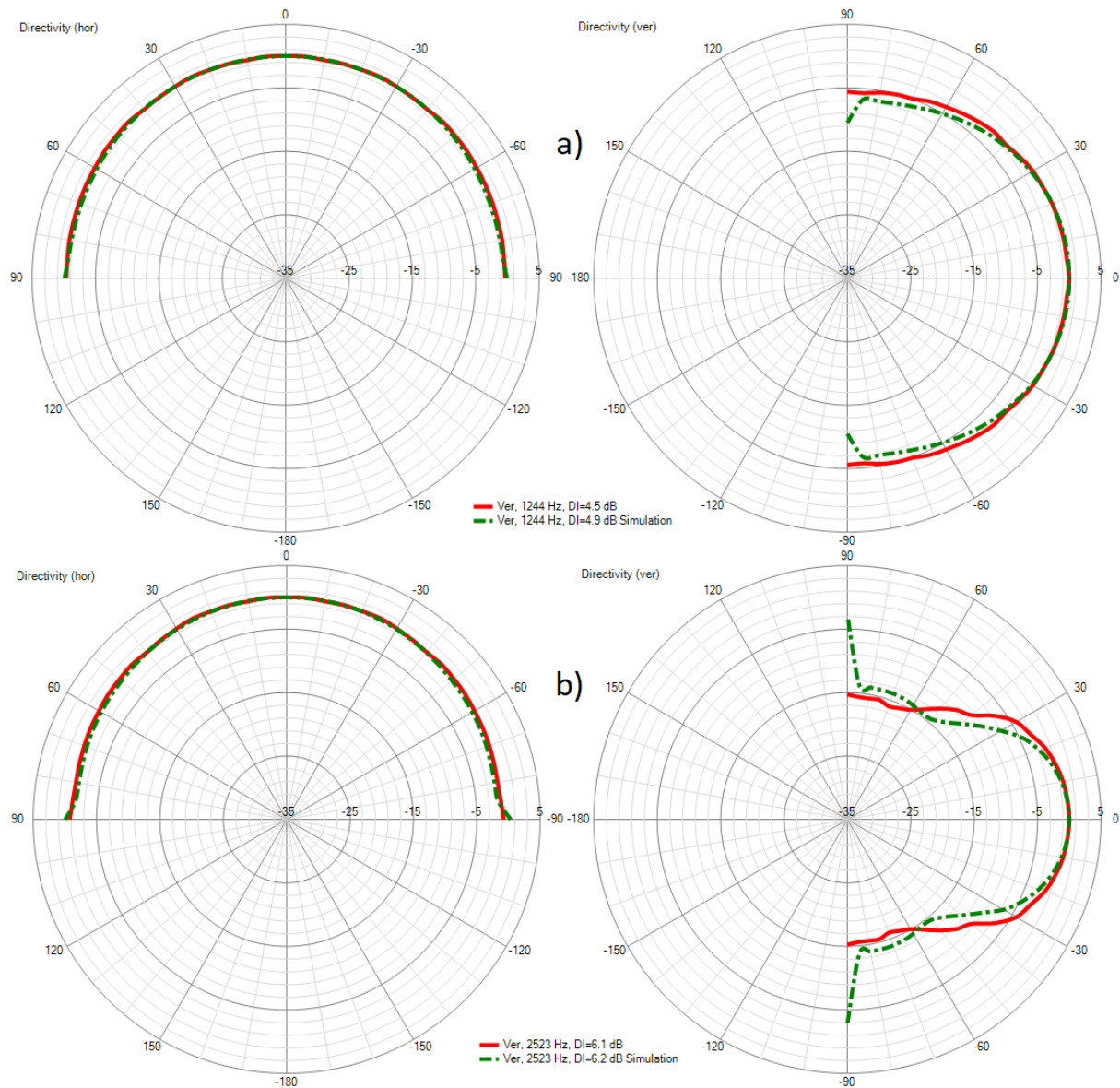
W przypadku porównania przebiegu zysku kierunkowości między polem 'bliskim' ($r = 0,25$ m) a 'dalekim' ($r = 1$ m) dla przetwornika bez soczewki (Rysunek 6.4 a), rozbieżność wzrasta proporcjonalnie do częstotliwości, znaczące różnice można zaobserwować dla najwyższej oktawy. Poniżej częstotliwości 10 kHz różnice są znikome, co może wynikać z braku spełnienia kryterium pola bliskiego dla tego zakresu mimo odległości $r = 0,25$ m (Tabela 6.1). Analogicznie jest w przypadku przetwornika z soczewką (Rysunek 6.4 b), gdzie kryterium pola bliskiego dla odległości $r = 0,25$ m jest spełnione dla częstotliwości wyższych niż 2,5 kHz, gdzie można zaobserwować wyraźne różnice między przebiegami. Poniżej tej częstotliwości przebiegi są zbliżone, wynika to z porównywania wyników pomiarów w różnych odległościach, ale nadal w polu bliskim.



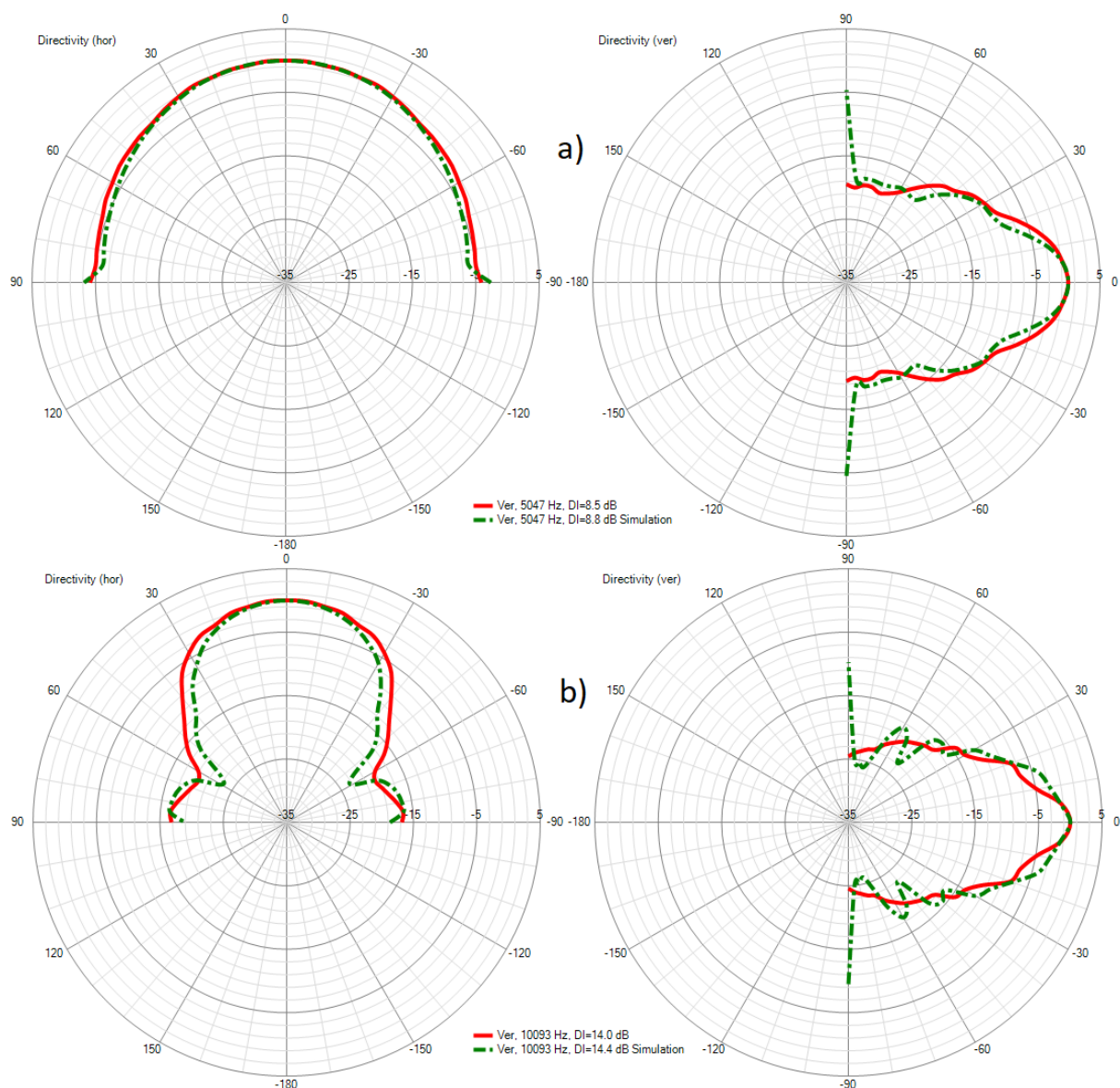
Rysunek 6.4 Pomiar zysku kierunkowości w funkcji częstotliwości, $r = 0,25$ m (linia oliwkowa przerywana), $r = 1$ m (linia czerwona ciągła), a) przetwornik bez soczewki, b) przetwornik z soczewką

6.3. Porównanie symulacji z pomiarami

Rysunki 6.5 – 6.10 przedstawiają rozkład poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji kąta względem osi ustalonej promieniowania. Wykresy w tym przypadku nie są, ściśle rzecz biorąc, charakterystykami kierunkowości źródła, ponieważ pomiary oraz symulacje dla odległości $r = 0,25$ m znajdowały się w polu bliskim powyżej częstotliwości 10 kHz oraz 5 kHz, kolejno dla przetwornika bez soczewki oraz z soczewką (Tabela 6.1). Celem prezentacji danych zebranych w tej odległości jest pokazanie różnic między wykonanymi symulacjami a pomiarami rzeczywistego przetwornika z wydrukowaną soczewką.

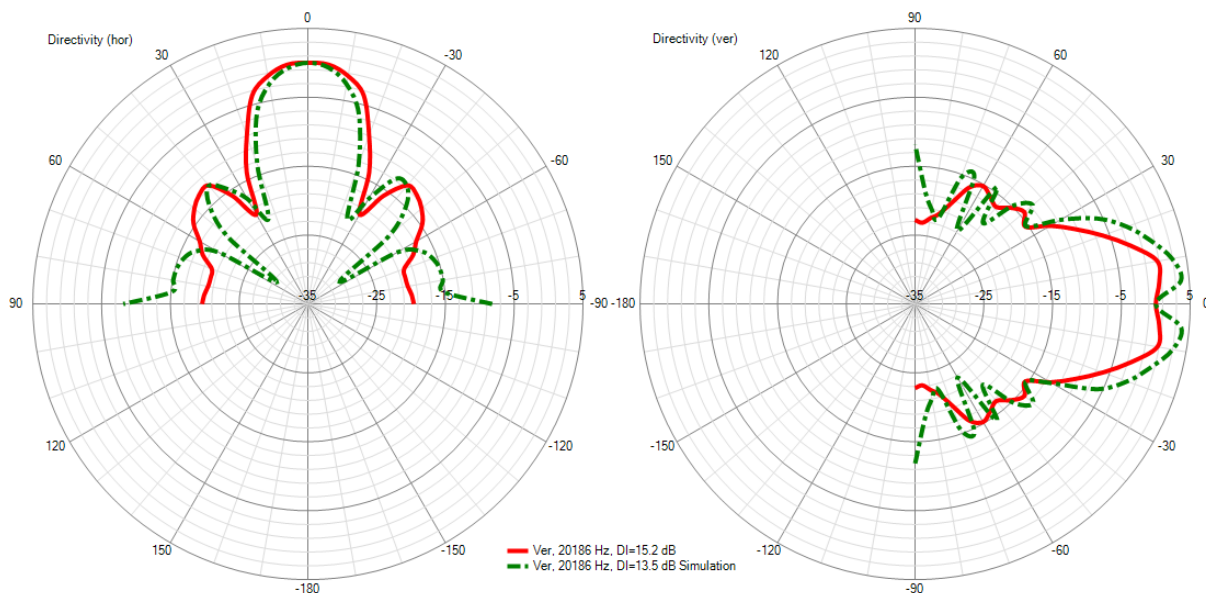


Rysunek 6.5 Poziom ciśnienia akustycznego w funkcji kąta w obu płaszczyznach, $r = 0,25$ m, symulacja (linia zielona przerywana), pomiar (linia czerwona ciągła), przetwornik bez soczewki, a) 1,25 kHz, b) 2,5 kHz



Rysunek 6.6 Poziom ciśnienia akustycznego w funkcji kąta w obu płaszczyznach, $r = 0,25$ m, symulacja (linia zielona przerywana), pomiar (linia czerwona ciągła), przetwornik bez soczewki, a) 5 kHz, b) 10 kHz

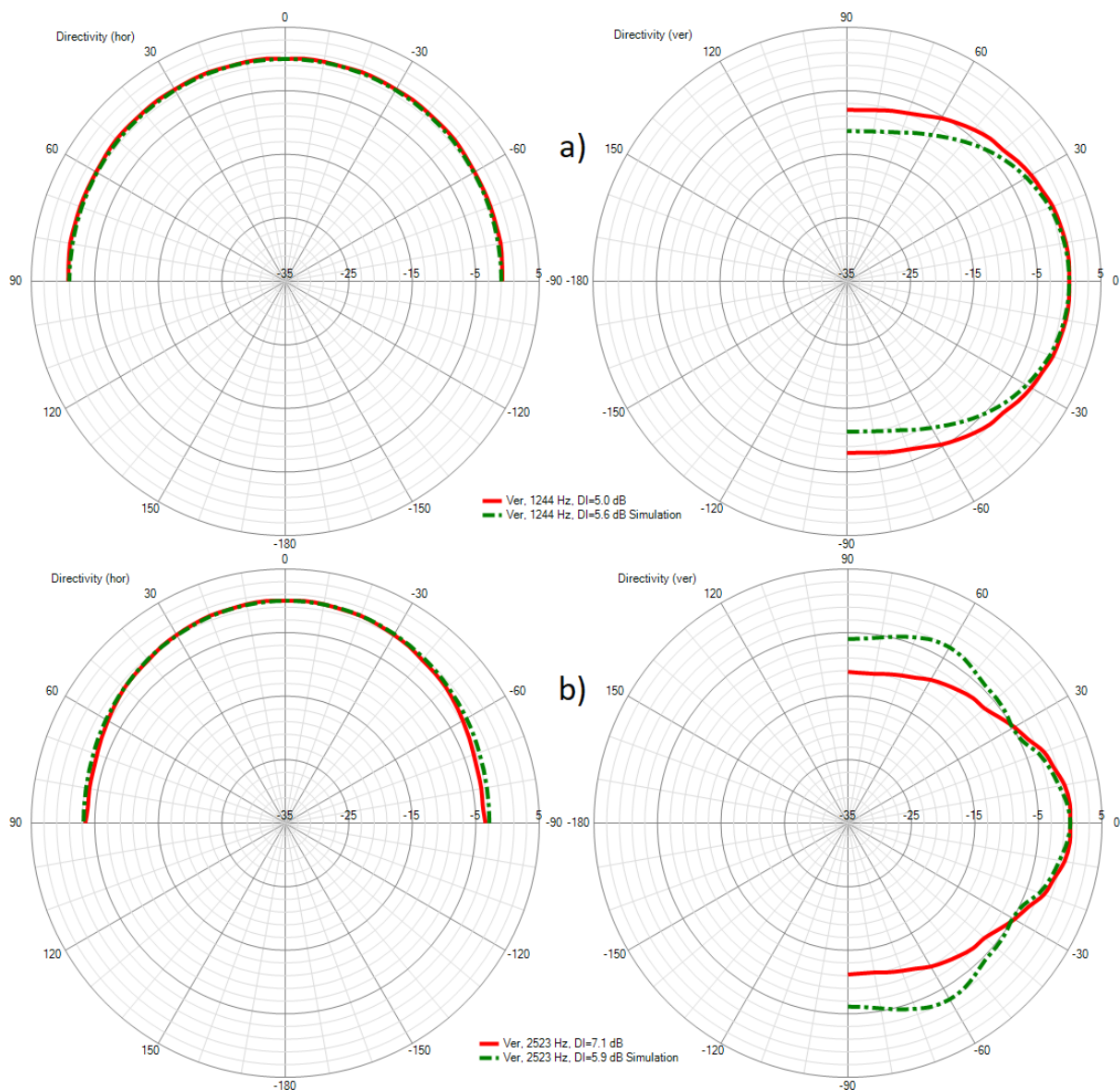
Na rysunkach 6.5 – 6.6 można zaobserwować podobieństwo przebiegu symulacji i pomiarów, różnice w poziomach między nimi w większości przypadków nie przekraczają 2 dB. Od częstotliwości 10 kHz, dla płaszczyzny pionowej (Rysunek 6.6 b) przebieg wartości zmierzonych przypomina ‘uśrednienie’ przebiegu symulacji w funkcji kąta, skutkiem czego listki boczne są mniej wyraźne. W badanej odległości od tej częstotliwości mamy do czynienia z polem bliskim, które charakteryzuje bardzo nierównomierny rozkład poziomu ciśnienia akustycznego w przestrzeni, przez co dokładność pozycjonowania mikrofonu podczas rzeczywistych pomiarów może mieć znaczący wpływ na zmierzone wartości.



Rysunek 6.7 Poziom ciśnienia akustycznego w funkcji kąta w obu płaszczyznach, $r = 0,25$ m, symulacja (linia zielona przerywana), pomiar (linia czerwona ciągła), przetwornik bez soczewki, 20 kHz.

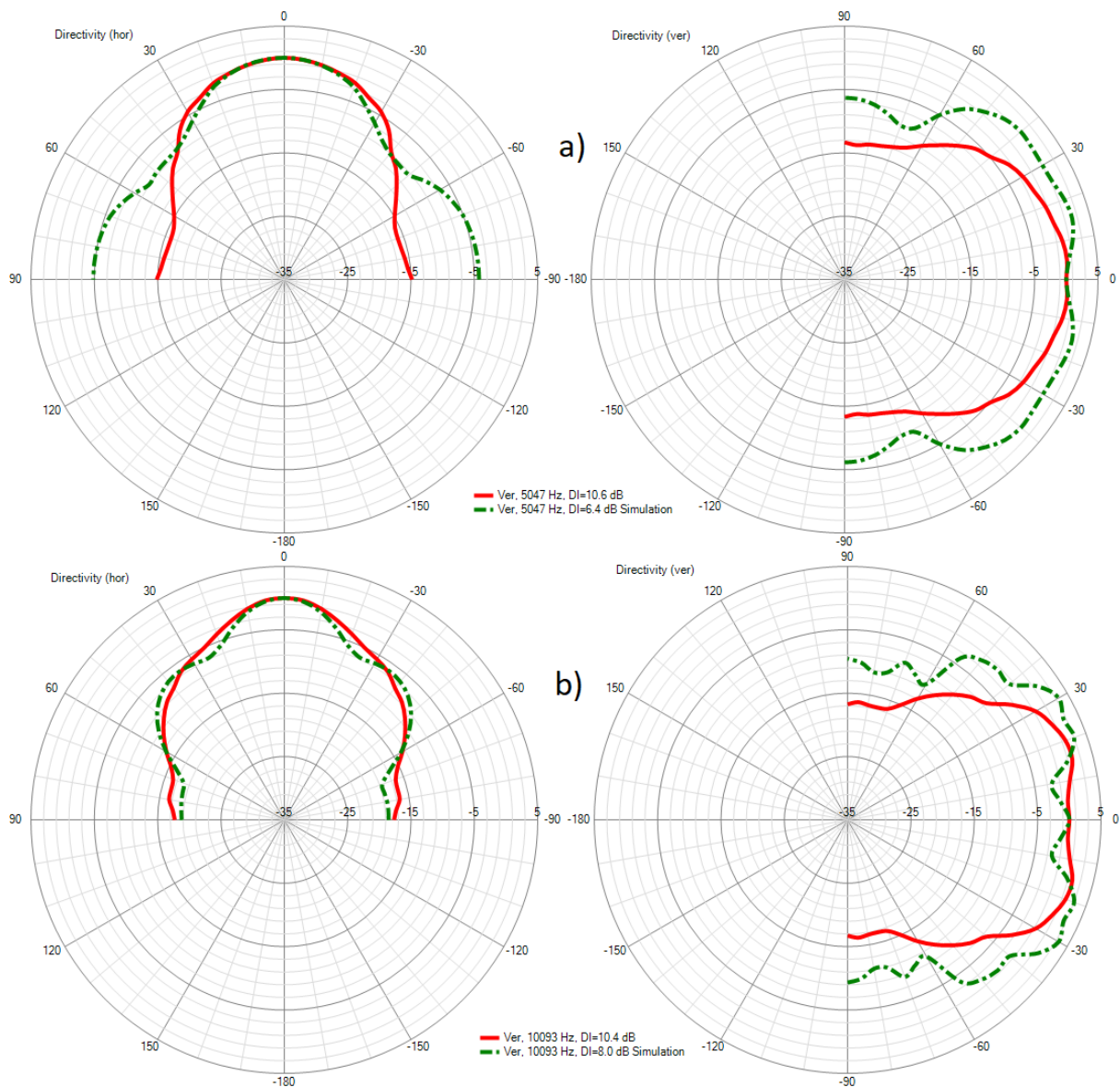
Przy częstotliwości 20 kHz (Rysunek 6.7) wyraźnie widoczna jest rozbieżność między pomiarami a symulacją w ilości listków bocznych, jednak listki główne są zbliżone kształtem. Rozbieżności są bardziej znaczące wraz ze wzrostem rozpatrywanych częstotliwości oraz kąta kierunku.

Analogicznie przedstawiono porównania przebiegów dla przetwornika z obecnością soczewki (Rysunek 6.8 – 6.10). W tym przypadku kryterium pola bliskiego jest spełnione dla mniejszych częstotliwości, ze względu na większy wymiar źródła jakie tworzy wylot soczewki. Większość pomiarów znajdowała się w polu bliskim, między innymi z tego powodu wyniki symulacji pokrywają się z wynikami pomiarów w mniejszym stopniu niż w przypadku przetwornika bez soczewki. Zależność rozbieżności między wartościami zmierzonymi a symulowanymi od częstotliwości i kąta kierunku jest taka jak w przypadku przetwornika bez soczewki. Główne listki są zbliżone kształtem, zmierzone listki boczne pod znacznymi kątami od osi są znacząco 'wygładzone' względem symulowanych.



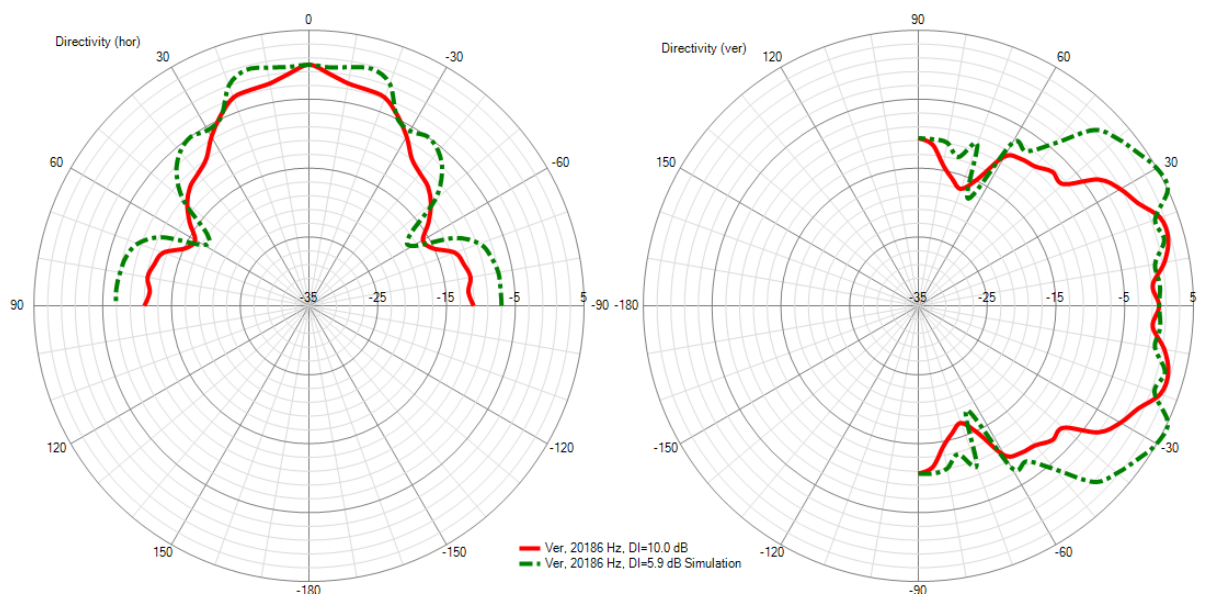
Rysunek 6.8 Poziom ciśnienia akustycznego w funkcji kąta w obu płaszczyznach, $r = 0,25$ m, symulacja (linia zielona przerywana), pomiar (linia czerwona ciągła), przetwornik z soczewką, a) 1,25 kHz, b) 2,5 kHz

Dla najniższych częstotliwości (Rysunek 6.8) można zaobserwować rozbieżność między przebiegami nieprzekraczającą 2 dB w całym zakresie kątowym w przypadku płaszczyzny poziomej, oraz w zakresie $-45^\circ - 45^\circ$ w płaszczyźnie pionowej.



Rysunek 6.9 Poziom ciśnienia akustycznego w funkcji kąta w obu płaszczyznach, $r = 0,25$ m, symulacja (linia zielona przerywana), pomiar (linia czerwona ciągła), przetwornik z soczewką, a) 5 kHz, b) 10 kHz

W przypadku częstotliwości spełniających kryterium pola bliskiego (Rysunek 6.9 – 6.10) rozbieżność między przebiegami nie przekracza 2 dB w zakresie nie mniejszym niż -45° - 45° w płaszczyźnie poziomej oraz około -20° - 20° w płaszczyźnie pionowej. Największe różnice między przebiegami można zaobserwować powyżej 30° poza osią.

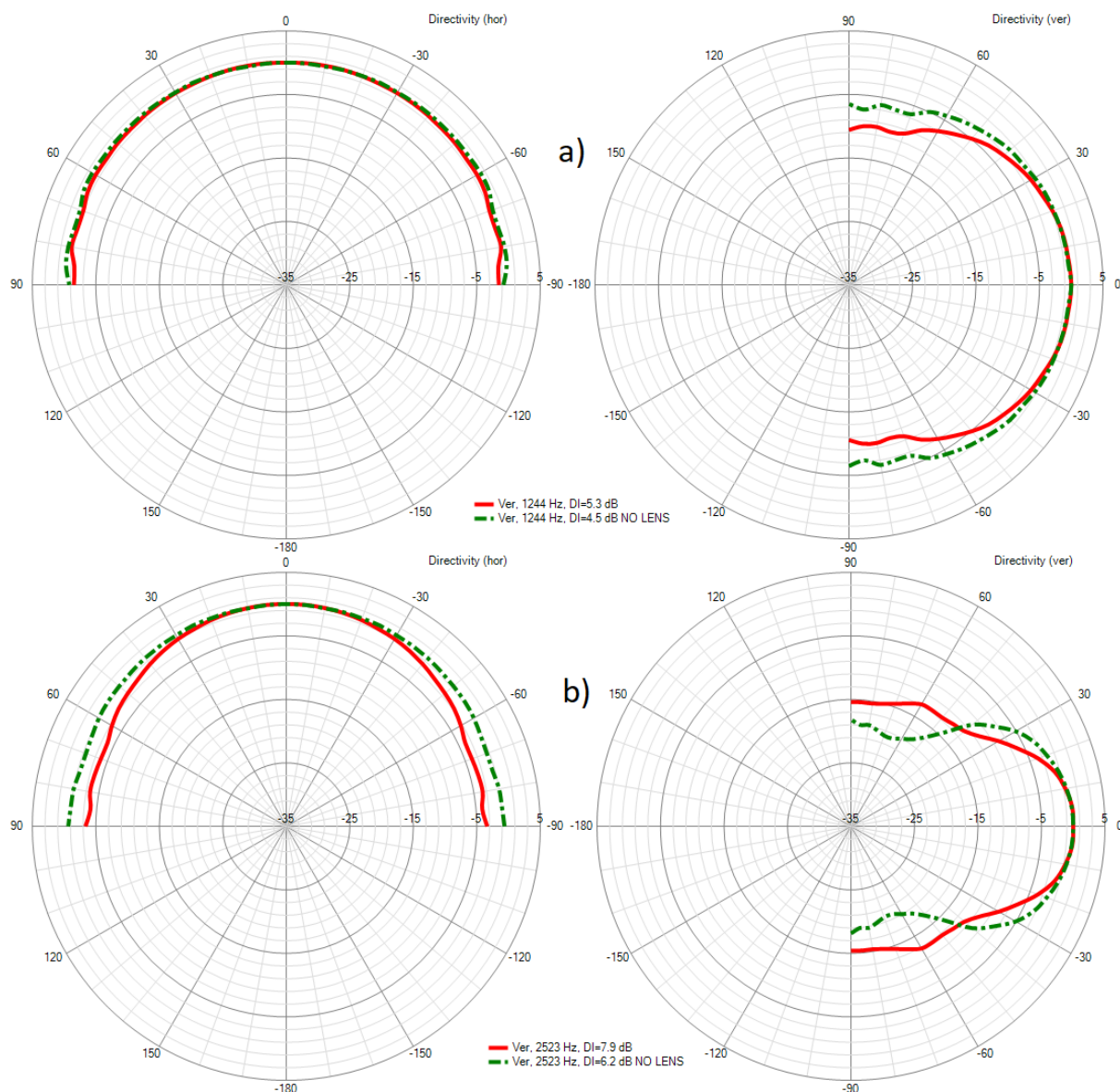


Rysunek 6.10 Poziom ciśnienia akustycznego w funkcji kąta w obu płaszczyznach, $r = 0,25$ m, symulacja (linia zielona przerywana), pomiar (linia czerwona ciągła), przetwornik z soczewką, 20 kHz

Oprócz nierównomiernego rozkładu poziomu ciśnienia akustycznego w całej objętości pola bliskiego, wpływ na wielkość różnicy między symulacjami a pomiarami dla dużych kątów poza osią może mieć również ograniczenie rozmiarów odgrody w symulacjach. W modelu użytym do obliczeń numerycznych ograniczenia maksymalnej odległości od źródła, były również maksymalnym promieniem symulowanej przegrody. Poza tym obszarem następowało wypromieniowanie fali akustycznej, bez uwzględnienia obecności powierzchni odbijającej. W przypadku pomiarów, mimo ograniczenia odległości mikrofonu od osi symetrii źródła do wartości takiej jak w symulacjach, występował wpływ odgrody w większej odległości. Rozważana różnica mogła się przyczynić do zmian wartości poziomu ciśnienia akustycznego w przestrzeni pomiędzy porównywanymi metodami.

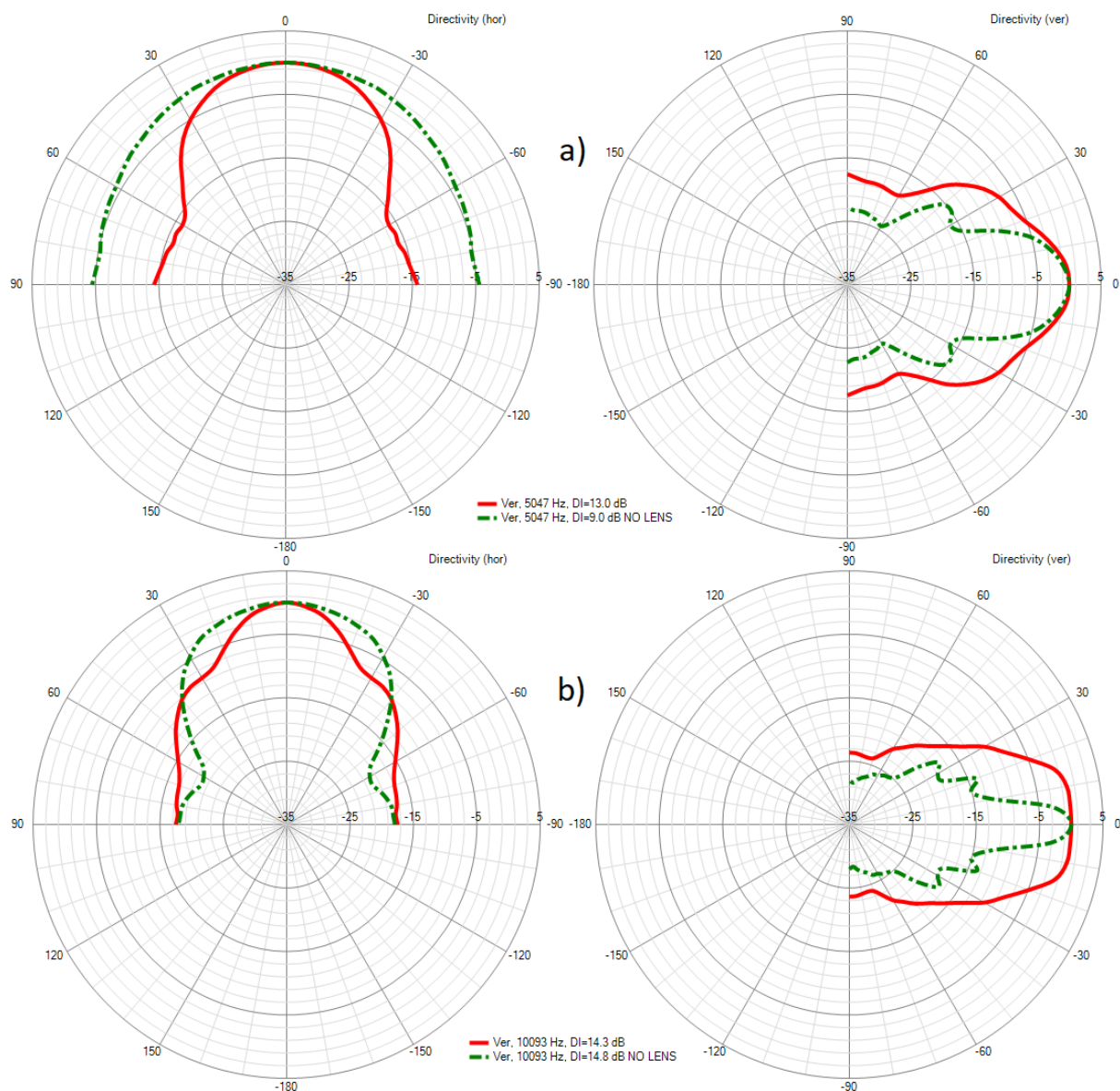
6.4. Charakterystyka kierunkowości

Odpowiedź amplitudowa źródła w przestrzeni, zmierzona w funkcji kątów elewacji oraz azymutu, charakteryzuje jego kierunkowość, gdy odległość w której pomiary zostały wykonane jest większa od długości pola bliskiego. Przeprowadzone pomiary w odległości $r = 1$ m spełniają kryterium pola dalekiego dla każdej rozpatrywanej częstotliwości (Tabela 6.1).



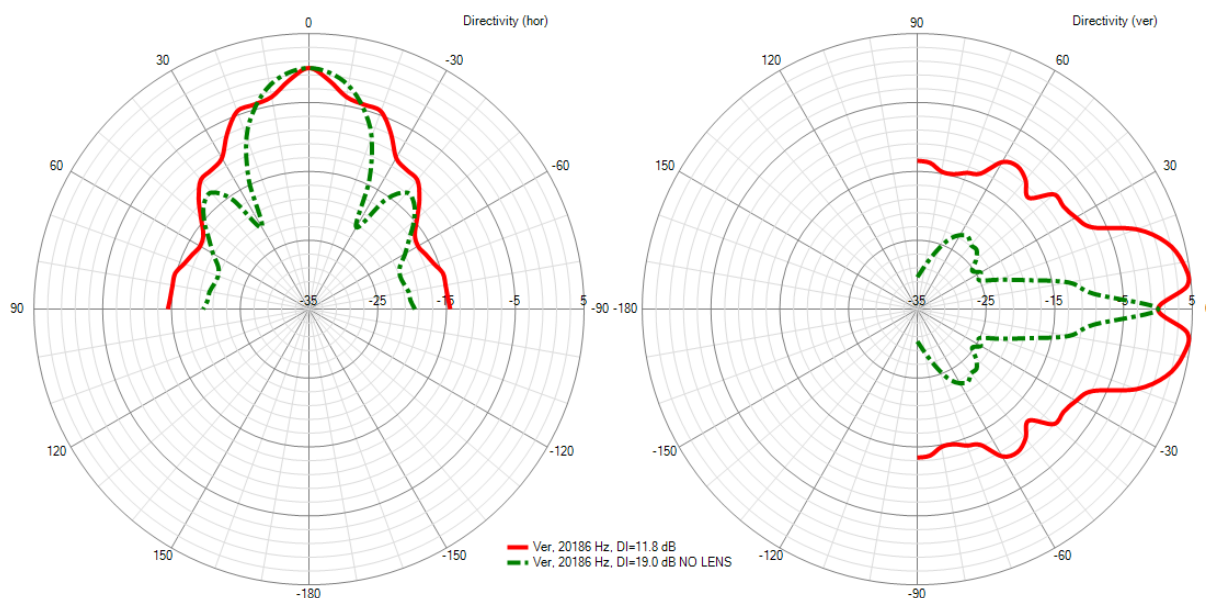
Rysunek 6.11 Poziom ciśnienia akustycznego w funkcji kąta w obu płaszczyznach, $r = 1$ m, pomiar bez soczewki (linia zielona przerywana), pomiar z soczewką (linia czerwona ciągła),
a) 1,25 kHz, b) 2,5 kHz

Już od najniższych częstotliwości (Rysunek 6.11) jest widoczny wpływ soczewki poprzez zwiększenie kierunkowości, szczególnie w przypadku płaszczyzny pionowej. Głównym powodem takiego zachowania jest zwiększenie wymiarów źródła, niekoniecznie wpływ na kształt czoła fali.



Rysunek 6.12 Poziom ciśnienia akustycznego w funkcji kąta w obu płaszczyznach, $r = 1$ m, pomiar bez soczewki (linia zielona przerywana), pomiar z soczewką (linia czerwona ciągła), a) 5 kHz, b) 10 kHz

W przypadku rosnących częstotliwości (Rysunek 6.12 – 6.13) wyraźnie widoczna jest rosnąca kierunkowość dla przetwornika bez soczewki, zwłaszcza w płaszczyźnie pionowej. Z kolei przetwornik z soczewką zachowuje relatywnie zbliżone rozmiary głównych listków dla wszystkich częstotliwości powyżej 5 kHz, zarówno w płaszczyźnie pionowej jak i poziomej, osiągając jeden z celów stosowania soczewki akustycznej.



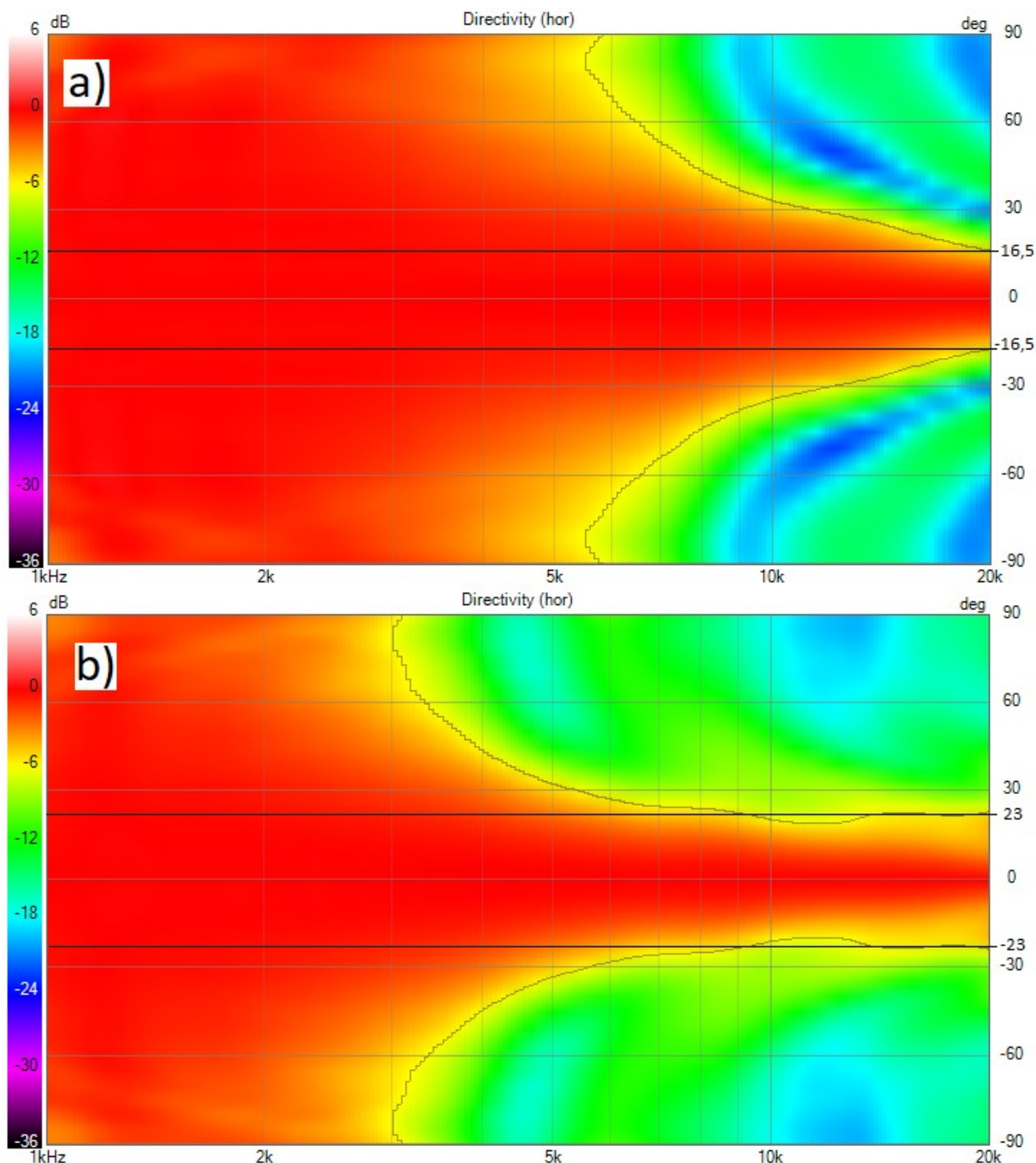
Rysunek 6.13 Poziom ciśnienia akustycznego w funkcji kąta w obu płaszczyznach, $r = 1$ m, pomiar bez soczewki (linia zielona przerywana), pomiar z soczewką (linia czerwona ciągła), 20 kHz

Działanie badanej soczewki najwyraźniej widać dla górnej granicznej częstotliwości 20 kHz (Rysunek 6.13), w szczególności w płaszczyźnie pionowej. Zwiększenie szerokości wiązki przy jednoczesnym zwiększeniu rozmiaru źródła nie jest możliwe dla jednorodnego rozkładu prędkości i fazy na całej powierzchni źródła. Pomiar wykazują działanie soczewki poprzez kształtowanie czoła fali, które skutkuje zmniejszeniem kierunkowości źródła.

6.5. Szerokość wiązki

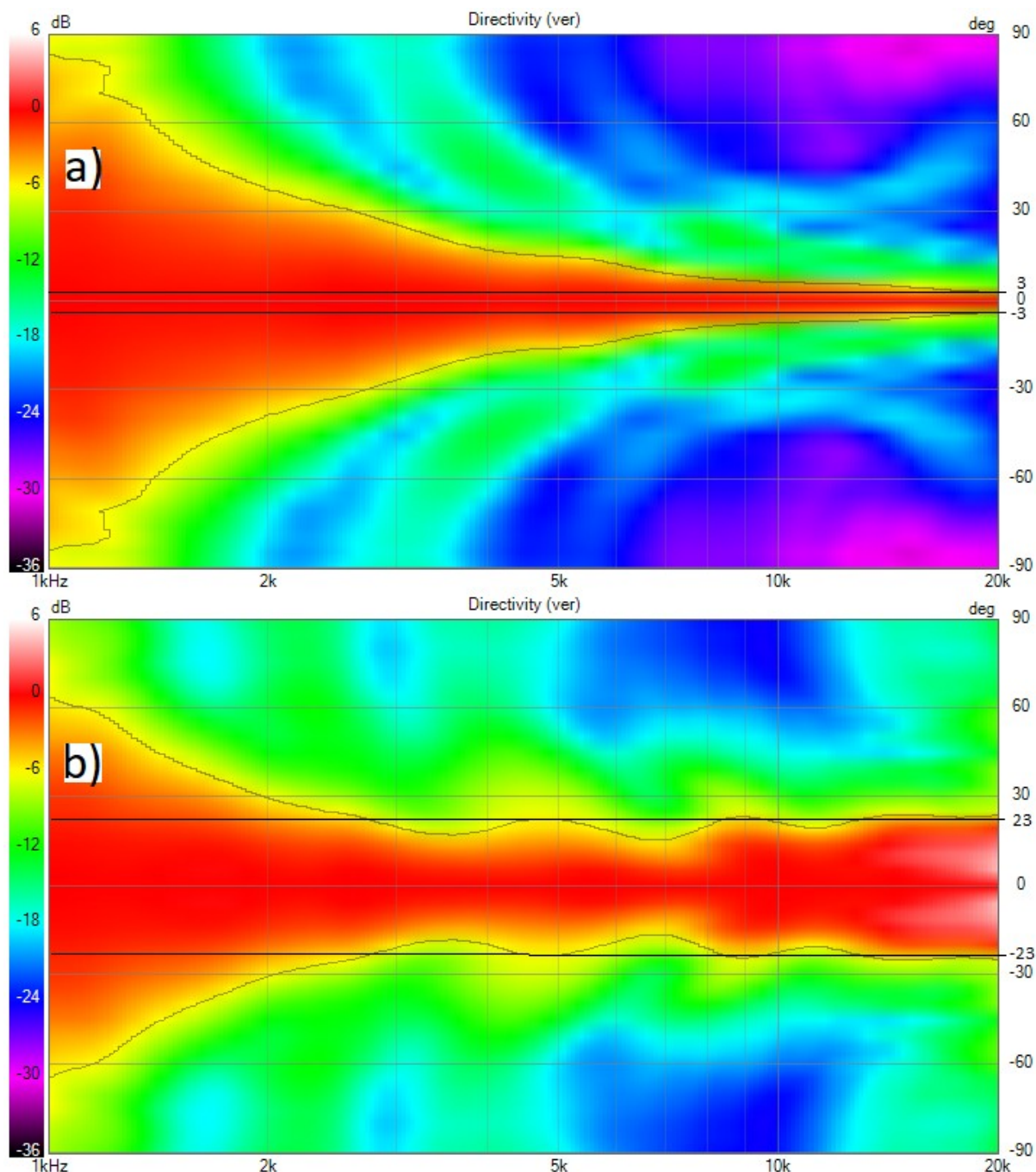
Do wyznaczenia szerokości wiązki w funkcji częstotliwości, należy zmierzyć kąt po obu stronach największego listka charakterystyki kierunkowości, w płaszczyźnie przechodzącej przez oś odniesienia między dwoma kierunkami, dla którego poziom ciśnienia akustycznego jest o 6 dB niższy niż poziom na osi odniesienia [9]. Przebieg wyznaczonych wartości w funkcji częstotliwości pozwala na czytelne obrazowanie rozkładu poziomu ciśnienia akustycznego w przestrzeni dla wszystkich badanych częstotliwości.

Podobnie jak w przypadku urządzeń tubowych, kształtowanie kierunkowości przetwornika elektroakustycznego ma na celu osiągnięcie pożądanego „pokrycia” (nazwa zwyczajowa). W zastosowaniu praktycznym pożądanym jest, aby pokrycie było w jak najmniejszym stopniu zależne od częstotliwości. Urządzenia elektroakustyczne o stałej szerokości wiązki w znaczącym, określonym zakresie częstotliwości są zwyczajowo nazywane urządzeniami o stałej kierunkowości. Poniższe wykresy (Rysunek 6.14, 6.15) przedstawiają pomiary wykonane w polu dalekim ($r = 1$ m), ich zgrupowanie pozwala porównać wpływ soczewki na kierunkowość źródła.



Rysunek 6.14 Poziom ciśnienia akustycznego w funkcji kąta (oś pionowa) i częstotliwości (oś pozioma), $r = 1$ m, pomiar w płaszczyźnie poziomej a) bez soczewki b) z soczewką. Szare krzywe wyznaczają spadek poziomu ciśnienia akustycznego o 6 dB względem poziomu na osi, czarne linie wyznaczają szerokość wiązki dla częstotliwości 20 kHz

Porównując wpływ soczewki na szerokość wiązki w funkcji częstotliwości dla płaszczyzny poziomej, czyli wzdłuż mniejszego rozmiaru źródła, można zaobserwować relatywnie stałą szerokość wiązki wynoszącą około 46° , w zakresie 7 kHz – 20 kHz (Rysunek 6.14 b). W tych samych warunkach przetwornik bez soczewki charakteryzował się typowym dla tłoka promieniującego w odgradzie spadkiem szerokości wiązki wraz z malejącą długością fali w stosunku do jego rozmiaru, osiągając wartość 37° dla częstotliwości 20 kHz (Rysunek 6.14 a).

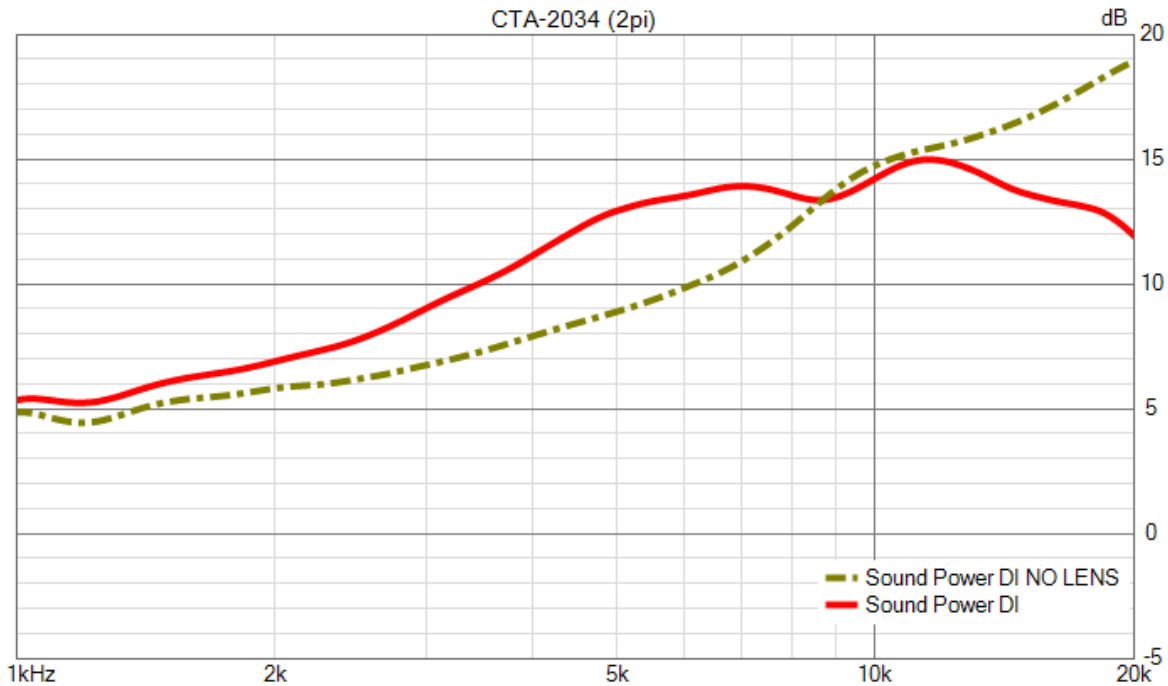


Rysunek 6.15 Poziom ciśnienia akustycznego w funkcji kąta (oś pionowa) i częstotliwości (oś pozioma), $r = 1$ m, pomiar w płaszczyźnie pionowej a) bez soczewki b) z soczewką. Szare krzywe wyznaczają spadek poziomu ciśnienia akustycznego o 6 dB względem poziomu na osi, czarne linie wyznaczają szerokość wiązki dla częstotliwości 20 kHz

W przypadku pomiarów w płaszczyźnie pionowej, czyli przechodzącej wzdłuż większego wymiaru źródła, skutkiem obecności soczewki jest relatywnie stała szerokość wiązki o wartości 46° w zakresie około 2.2 – 20 kHz (Rysunek 6.15 b). Dolna granica tego zakresu jest ściśle związana z wymiarem źródła wzdłuż badanej płaszczyzny. Stosunek początkowych wartości częstotliwości zakresów stałej szerokości wiązki jest zbliżony do stosunku wymiarów źródła z soczewką, około 3,3 : 1 (Tabela 6.1). W tych samych warunkach przetwornik bez soczewki analogicznie do płaszczyzny poziomej charakteryzował się spadkiem szerokości wiązki wraz z malejącą długością fali, osiągając wartość 6° dla częstotliwości 20 kHz (Rysunek 6.15 a).

6.6. Stała kierunkowość

Analizując kierunkowość przetwornika z badaną soczewką (Rysunek 6.14 b, 6.15 b) widać stałą szerokość wiązki w zakresie częstotliwości, gdzie soczewka działa skutecznie. Relatywnie stała kierunkowość jest również widoczna na przebiegu zysku kierunkowości, zmierzonego w polu dalekim, dla przetwornika z soczewką (Rysunek 6.16).



Rysunek 6.16 Zysk kierunkowości w funkcji częstotliwości, $r = 1$ m , przetwornik bez soczewki (linia oliwkowa przerywana) oraz z soczewką (linia czerwona ciągła)

Odpowiedzią może być praca dotycząca przetworników o stałej kierunkowości (Constant Beamwidth Transducer, „CBT”) w postaci wycinka pulsującej sfery o kącie połowicznym θ_0 , czyli dla każdego punktu na jej powierzchni wektor prędkości jest prostopadły do płaszczyzny stycznej w tym punkcie [4]. Jeśli rozkład prędkości w funkcji kąta maleje do zera na krawędzi wycinka sfery ($\theta = \theta_0$), zgodnie z funkcją Legrendre’a (6.10), to rozkład ciśnienia w polu dalekim jest w przybliżeniu taki jak rozkład ciśnienia na pulsującej sferze (6.11).

$$u(\theta) = \begin{cases} P_v(\cos \theta) & \text{for } \theta \leq \theta_0 \\ 0 & \text{for } \theta > \theta_0 \end{cases} \quad (6.10)$$

gdzie $u(\theta)$ to kątowna dystrybucja prędkości,

θ to kąt elewacji we współrzędnych sferycznych ($\theta = 0$ jest środkiem symetrii wycinka sfery),

θ_0 to kąt połowiczny wycinka sfery,

$P_v(x)$ to funkcja Legrendre’a rzędu v ($v > 0$) argumentu x .

$$p(\theta) = \begin{cases} P_v(\cos \theta) & \text{for } \theta \leq \theta_0 \\ 0 & \text{for } \theta > \theta_0 \end{cases} \quad (6.11)$$

gdzie $p(\theta)$ to kątowa dystrybucja ciśnienia.

Funkcja Legendre'a $P_v(\cos \theta)$ jest równa jedności dla $\theta = 0$ oraz pierwszy raz przechodzi przez zero pod kątem $\theta = \theta_0$, na granicy wycinka sfery.

Tego typu źródło cechuje się stałą szerokością wiązki w funkcji częstotliwości, powyżej częstotliwości odcięcia związanej z rozmiarem wycinka sfery. Częstotliwość ta jest trudna do wyznaczenia analitycznie, przyjmuje się, że długość fali powinna być nie większa niż rozmiar źródła. Wykazano to obliczeniami numerycznymi, osiągając minimalizację listków bocznych [4].

Dowodzono również, że szerokość wiązki powyżej częstotliwości odcięcia jest w przybliżeniu równa $2\theta_0$. Ten sam wycinek sfery bez cieniowania, ze stałym rozkładem jednakowej prędkości również zachowuje relatywnie stałą kierunkowość w funkcji częstotliwości, jednak z periodycznymi minimami i maksimami, ściśle związanymi z wysokością wycinka sfery. Gdy jego wysokość $r(1-\cos\theta_0)$ jest równa całkowitej wartości połowy długości fali $m\lambda/2$, to nieparzyste wartości m odpowiadają minimom kierunkowości a parzyste maksimom.

Badany przypadek posiada większe listki boczne niż źródło „CBT”, większą nierównomierność szerokości wiązki oraz współczynnik kierunkowości w funkcji częstotliwości. Przebiegi wykreślone na podstawie pomiarów w polu dalekim cechują się znacznie mniejszymi ekstremami w nierównomierności szerokości wiązki niż teoretyczny przykład przetwornika w postaci wycinka pulsującej sfery bez cieniowania, która nie była w odgrodzie, w przeciwieństwie do omawianej soczewki. Przyjmując częstotliwości odcięcia jako długości fali równe wymiarom matrycy wyjściowej, w płaszczyźnie poziomej wynosi $f_{x\min} = 4764$ Hz, w płaszczyźnie pionowej $f_{y\min} = 1441$ Hz.

6.7. Pulsująca elipsoida

Wykorzystując informację o zmierzonej wartości szerokości wiązki promieniowania soczewki dla obu płaszczyzn, wyznaczono geometrycznie promień wycinka pulsującej elipsoidy na wykresach obliczonego numerycznie rozkładu ciśnienia akustycznego (Rysunek 6.17, 6.18). Wartości są zbliżone dla wszystkich częstotliwości powyżej częstotliwości odcięcia dla każdej z płaszczyzn, zaprezentowano przykład dla $f = 10$ kHz. Promień wycinka elipsoidy, której działanie imituje opracowana soczewka to 130 mm w płaszczyźnie poziomej i 320 mm w płaszczyźnie pionowej, wyniki te różnią się w granicach $\pm 10\%$ od szacowanych (podrozdział 3.2).

Rozdział 7.

Podsumowanie

7.1. Symulacje

Projekt geometryczny soczewki pozwala na osiągnięcie rzeczywistego wpływu na rozchodzenie się fali ciśnienia akustycznego w przestrzeni. Wpływ soczewki jest związany z rozmiarami matrycy wyjściowej w stosunku do długości fali, jak w przypadku każdego innego typu źródła. Rozchodzenie się fali ciśnienia akustycznego po stronie soczewki jest dzielone i opóźnione przez poszczególne kanały o różnej długości, skutkując zakrzywieniem czoła fali na macierzy wyjściowej. Promień tej krzywizny można kontrolować na etapie projektowania geometrycznego. Wyniki symulacji (Rysunek 4.2 – 4.4) wyraźnie wskazują na istotny wpływ na kształt czoła fali akustycznej promieniowanej przez przetwornik izodynamiczny. Rozkład ciśnienia akustycznego dla rozmiaru 'pionowego' wskazuje na zakrzywienie czoła fali pod wpływem działania soczewki względem widocznej fali płaskiej promieniowanej przez sam przetwornik. Skuteczność działania soczewki zależy od jej rozmiarów, dlatego mniejszy wpływ na kształt czoła fali można zaobserwować wzdłuż "poziomego", krótszego wymiaru, mimo to powyżej częstotliwości odcięcia widoczny jest wpływ soczewki na zwiększenie promienia krzywizny w pewnym zakresie kątowym względem promieniowania samego przetwornika, gdzie mamy do czynienia z zachowaniem zbliżonym do źródła punktowego (Rysunek 4.2 b).

Zakrzywienie frontu falowego ma bezpośredni wpływ na kierunkowość źródła, pozwalając na kontrolę szerokości wiązki dla długości fali mniejszych niż wymiary powierzchni promieniującej. Dla każdego przypadku tłoka w odgradzie, który promieniuje wycinak fali płaskiej, kierunkowość jest wprost proporcjonalna do częstotliwości. Zachowanie obu przypadków jest widoczne na wykresach rozkładu poziomego ciśnienia akustycznego w przestrzeni (Rysunek 4.5, 4.6), gdzie można zaobserwować malejącą

szerokość wiązki po stronie fali płaskiej oraz rozproszone promieniowanie po stronie zagiętego frontu falowego.

7.2. Pomiary

Dokładność z jaką wykonano model soczewki jak i dokładności w systemie pomiarowym (pozycjonowanie, napięcie, poziom ciśnienia akustycznego) znacząco przewyższają dokładność odwzorowania modelu soczewki w symulacji, biorąc pod uwagę wymiary elementów przestrzennej siatki obliczeniowej. Dowodem na powtarzalność pomiarów są wszystkie wykresy gdzie przedstawiono wyniki w zakresie kątowym od -90° do 90° (Rysunek 6.5 – 6.15), gdzie uzyskano symetrię przebiegów względem osi (0°). Każdy z wyników po obu stronach osi był niezależnym pomiarem, który pokrywa się wynikiem z pomiarem odpowiadającym po przeciwnej stronie. Świadczy to o braku wpływu warunków pomiarowych, niepewności oraz dokładności pozycjonowania na prezentowane wyniki.

Przed przystąpieniem do właściwych pomiarów została zbadana kwestia granicy pola bliskiego, która przy stałych wymiarach źródła zależy od częstotliwości. Źródło wyposażone w soczewkę ma większe rozmiary, więc granica pola bliskiego również się zwiększa. Przy tak dużym zakresie badanych długości fali należało ustalić ‘najgorszy przypadek’, czyli przetwornik z soczewką pracujący z najwyższą rozpatrywaną częstotliwością, gdzie teoretyczna granica pola bliskiego znajduje się poniżej odległości 1 m (Tabela 6.1). Można założyć, że wszystkie pomiary wykonane w odległości 1 m są w polu dalekim, dla wszystkich przypadków. Zmierzony spadek poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji odległości (Rysunek 6.1, 6.2) dla przetwornika z i bez soczewki wykazuje zależność odległości pola dalekiego od częstotliwości, która jest większa dla pierwszego. Również pomiary porównujące zysk kierunkowości dla odległości 0,25 m oraz 1 m (Rysunek 6.4) potwierdzają różnicę między polem bliskim a dalekim, szczególnie dla wyższych częstotliwości.

7.3. Zgodność pomiarów i symulacji

Porównując wyniki uzyskane w pomiarach z wynikami symulacji, zarówno dla zysku kierunkowości (Rysunek 6.3 A), jak i rozkładu poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji kąta (Rysunek 6.5 – 6.7), można zaobserwować duże podobieństwa listków głównych w przypadku przetwornika bez soczewki.

W przypadku analogicznych przebiegów dla przetwornika z soczewką (Rysunek 6.3 A, 6.8 – 6.10) widoczna jest rozbieżność między symulacjami a pomiarami w postaci większych listków bocznych w przypadku tych pierwszych. Powodów tych niezgodności może być wiele, zaczynając od ograniczonych rozmiarów odgody w symulacji, gdzie przy

wykonywaniu pomiarów odgroda mogła mieć wpływ na wyniki pomiaru znajdując się również poza odległością w jakiej znajdował się mikrofon pomiarowy. Po zwróceniu uwagi na relatywnie stałą kierunkowość po zastosowaniu soczewki (Rysunek 6.14, 6.15), dokonano porównania z rozważaniami zawartymi w pracach traktujących o 'CBT' [4, 12 – 16, 19], gdzie analizowano między innymi kierunkowości wycinka pulsującej sfery, z 'cieniowaniem' oraz bez. Badany w rozprawie przypadek wykazuje zachowanie bliższe wycinkowi z cieniowaniem, co sugeruje możliwość występowania jakiejś formy tłumienia w zewnętrznych komórkach macierzy wyjściowej. Nie jest również wykluczony niejednorodny rozkład prędkości na całej powierzchni membrany przetwornika izodynamicznego, ze względu na jej mocowanie wzdłuż obwodu, jednak zgodność pomiarów i symulacji w przypadku samego przetwornika sugeruje znikomą niejednorodność. Tłumienie, jeśli występuje, może być związane ze znaczną długością zewnętrznych tuneli soczewki, znacząco zmieniających kierunek propagacji. Zjawiska lepkości i stratności materiału, z którego została wykonana soczewka nie zostały uwzględnione w symulacji, ze względu na ograniczenia sprzętu komputerowego. Jeśli te zjawiska rzeczywiście występują, tłumienie rośnie wprost proporcjonalnie do długości kanałów łączących matryce. W takim przypadku tłumienie jest najmniejsze w środku geometrycznym matrycy wyjściowej, a największe w brzegowych komórkach, podobnie jak w przypadku urządzeń 'CBT'. Dodatkowym czynnikiem mogącym mieć wpływ na rozbieżności między pomiarem a symulacją jest fakt wykonywanie jednych i drugich w polu bliskim, gdzie rozkład poziomego ciśnienia akustycznego w przestrzeni jest bardzo zmienny, pozycja mikrofonu ma diametralny wpływ na wynik pomiaru w tej strefie.

7.4. Wpływ soczewki

Analizując charakterystyki kierunkowości wykonane w polu dalekim (Rysunek 6.11 – 6.13) można zwrócić uwagę, że wpływ soczewki jest w całym badanym zakresie częstotliwości. Dla płaszczyzny pionowej widoczne jest zwiększenie kierunkowości w zakresie 1250 Hz – 2,5 kHz, oraz zmniejszenie dla częstotliwości powyżej tego zakresu. Analogiczne działanie widoczne jest dla płaszczyzny poziomej, zwiększenie w zakresie 1250 Hz – 5 kHz, zmniejszenie powyżej tego zakresu. Te obserwacje są również widoczne na przebiegu zysku kierunkowości, którego wartości uwzględniają obie płaszczyzny, charakteryzując kierunkowość źródła w całej przestrzeni pola dalekiego (Rysunek 6.16). Porównując ten przebieg na jednym wykresie z przebiegiem zysku kierunkowości przetwornika bez soczewki, widoczna jest większa kierunkowość od najniższych częstotliwości oraz w przybliżeniu ± 1 dB stały zysk powyżej 5 kHz, gdzie przebieg zysku kierunkowości bez soczewki stale rośnie wraz z częstotliwością.

Holistyczną metodą prezentacji kierunkowości przetwornika jest rozkład poziomego ciśnienia akustycznego w funkcji częstotliwości i kąta (Rysunek 6.14, 6.15), na których wykreślone są krzywe wyznaczające 6dB spadek względem poziomu na osi. Krzywe te pozwalają odczytać szerokość wiązki w funkcji częstotliwości, w obu płaszczyznach dla

przetwornika z soczewką jest w przybliżeniu $\pm 2^\circ$ stała, powyżej częstotliwości odcięcia. W przypadku przetwornika bez soczewki, zgodnie ze wzrostem zysku kierunkowości w obu płaszczyznach maleje szerokość wiązki wraz ze wzrostem częstotliwości. Najbardziej drastyczna różnica po zastosowaniu soczewki jest w płaszczyźnie pionowej dla częstotliwości 20 kHz, gdzie szerokość wiązki wzrasta niemal ośmiokrotnie.

7.5. Dowód tezy

Poniżej podano listę argumentów, które według autora potwierdzają stawianą tezę: „Jest możliwe stworzenie soczewki akustycznej pozwalającej na regulację krzywizn czoła fali w obu płaszczyznach, dla dowolnego kształtu źródła.”

1. Symulacje pola ciśnienia akustycznego wykazują wyraźne zagięcie frontu falowego dla obu płaszczyzn, powyżej częstotliwości odcięcia. Wizualizacja propagacji fali ciśnienia akustycznego wskazuje na działanie zgodne z założeniami, kolejne komórki macierzy wyjściowej ‘opóźniają’ front falowy, tworząc krzywiznę.
2. Pomiary oraz wyniki obliczeń numerycznych w polu bliskim wyraźnie wskazują na wpływ soczewki na rozkład poziomu ciśnienia akustycznego w przestrzeni, przetwornik z soczewką cechuje rozproszenie energii dla wyższych częstotliwości.
3. Analiza szerokości wiązki w funkcji częstotliwości, w polu dalekim, wskazuje na stałą szerokość wiązki powyżej częstotliwości odcięcia. Zastosowanie soczewki spowodowało zwiększenie rozmiarów źródła, jednocześnie osiągnięto zmniejszenie kierunkowości dla wysokich częstotliwości, co jest niemożliwe dla układu bez soczewki.
4. Przetwornik o różnej szerokości wiązki dla płaszczyzny poziomej i pionowej został za pomocą soczewki przekształcony w przetwornik o zbliżonej szerokości wiązki dla obu płaszczyzn, dzięki niezależnemu dla każdej z płaszczyzn kształtowaniu frontu falowego.
5. Soczewkę zaprojektowano dla prostokątnego kształtu źródła, jednak zasady projektowania pokazane w tej rozprawie są odpowiednie dla dowolnego kształtu przetwornika.
6. Działanie soczewki jest możliwe powyżej częstotliwości odcięcia, czyli dolnej granicznej częstotliwości zależnej od wymiarów matrycy wyjściowej.

7.6. Zastosowanie

Działanie soczewki może potencjalnie umożliwić powstanie głośnika o stałej kierunkowości, skutecznie rywalizującego ze znacznie większymi rozwiązaniami tubowymi. W porównaniu z konwencjonalnymi falowodami, prezentowane rozwiązanie minimalizuje odległość pomiędzy przetwornikiem a właściwym „wyjściem”, zmniejszając gabaryty urządzenia głośnikowego, a także wprowadzane opóźnienie akustyczne związane z prędkością propagacji.

Zakrzywianie czoła fali uzyskane przez omawiany typ soczewki może również być osiągane w większych układach soczewek, zapewniając sumowanie sygnałów z wielu źródeł z niewielkimi lub żadnymi destrukcyjnymi interferencjami między nimi. Ta cecha pozwala na zaprojektowanie określonej krzywizny frontu falowego i rozmiaru źródła za pomocą wielu przetworników zachowujących się jak pojedynczy o zadanych parametrach kierunkowości.

Tak jak w przykładzie pokazanym w tej rozprawie, soczewki można zastosować do korekcji wzrostu zysku kierunkowości w funkcji częstotliwości, dla źródeł promieniujących małe długości fali w stosunku do swoich wymiarów.

7.7. Dalsze badania

Planowane jest rozszerzenie symulacji poprzez uwzględnienie lepkości i strat termicznych, jak tylko będzie można skorzystać z nowoczesnego serwera obliczeniowego/stacji roboczej wyposażonej w 2 TB lub więcej pamięci operacyjnej. Aby zbadać możliwość pracy tego typu soczewek w warunkach profesjonalnego nagłośnienia scenicznego, należy przeprowadzić obliczenia z uwzględnieniem nieliniowego zachowania ośrodka przy dużych poziomach ciśnienia akustycznego. Model numeryczny uwzględniający zjawiska nieliniowe pozwoli na analizę realistycznej dystrybucji tłumienia w kanałach soczewki i ich wpływ na kierunkowość oraz zniekształcenia nieliniowe przy znaczącej mocy z którą może pracować przetwornik.

Mając dostęp do sprzętu umożliwiającego wykonywanie symulacji w krótszym czasie, planowane jest zaprojektowanie, obliczenia numeryczne, wydruk i pomiary soczewki o tych samych wymiarach zewnętrznych, ale innych promieniach krzywizny. Przy zastosowaniu identycznego przetwornika oraz warunków pomiarowych, będzie możliwe porównanie wyników z soczewką omawianą w rozprawie.

O ile zachowanie prezentowanej w tej rozprawie soczewki pod względem kontroli kierunkowości jest obiecujące, należy sprawdzić wpływ płaskiej matrycy wyjściowej, gdzie każda komórka leży na płaszczyźnie tworzącej odgradę. Podobnie jak w przypadku fizycznego ustawienia urządzeń głośnikowych w jednej linii z ‘wirtualnym’

łukiem osiąganym za pomocą dystrybucji opóźnień sygnałów, pojawiają się dodatkowe, niepożądane listki boczne w charakterystykach kierunkowości w porównaniu z fizycznym ustawieniem urządzeń w łuku bez elektrycznych opóźnień. Wskazane jest porównanie z soczewką o tych samych wymiarach matrycy zewnętrznej oraz promieniach krzywizn, która opóźnienia wprowadza nie poprzez różnicę długości kanałów, tylko przez kształt matrycy wyjściowej.

Przydatne dla praktycznych zastosowań może okazać się badanie jednego z zastosowań omawianej technologii, soczewki jednostkowe projektowane pod kątem pracy jako większe, spójne źródło o zadanych parametrach kierunkowości. Opracowanie i pomiary przykładu takiego urządzenia składającego się z kilku przetworników pozwolą ocenić rzeczywiste zalety rozwiązania w porównaniu do dotychczasowych.

Literatura

1. Augspurger George L.; „The Acoustical Lens”; Electronics World; grudzień 1962
2. Beranek L.; Mellow T.; „Acoustics: Sound Fields, Transducers and Vibration”; 2nd Edition - May 21; Academic Press; 2019
3. Berstis V.; „3D printed acoustic lens for dispersing sound”; J. Audio Eng. Soc., vol. 66, no. 12, pp. 1082–1093; 2018
4. Buren A. L. Van, Rogers P. H.; „New Approach to a Constant Beamwidth Transducer”; J. Acous. Soc. Am., vol. 64, nr 1, s. 38-43; lipiec 1978
5. Cervera F.; „An overview of phononic crystals”; Phys. Rev. Lett. 88, 023902; 2002
6. Comsol documentation website;
https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.aco/aco_ug_pressure.05.002.html
<https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.aco/AcousticsModuleUsersGuide.pdf>
https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.comsol/comsol_ref_acoustics.23.20.html
(uzyskano dostęp dnia 2023.07.10)
7. Dahl T., Ealo J. L., Papakonstantinou K., Pazos J. F.; „Design of Acoustic Lenses for Ultrasonic Human-Computer Interaction”; IEEE International Ultrasonics Symposium; 2011
8. Danley T. J.; „Horn-loaded acoustic line source”; United States Patent Number 8259981B2; 2012
9. Dobrucki A.; „Przetworniki elektroakustyczne”; WNT; 2007
10. Heil C.; „United States Patent Number 5,163,167 (US005163167A)”; 1992
11. International Electrotechnical Commission; „Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications”; IEC 61672-1:2013

12. Keele JR D. B A; "Ground Plane Measurement Comparison Between Two Floor-Standing Loudspeaker Systems: A Conventional Three-Way Studio Monitor vs. A Ground-Plane Constant Beamwidth Transducer (CBT) Line Array"; Audio Engineering Society Convention 141; wrzesień 2016
13. Keele JR D. B; "Design of Free-Standing Constant Beamwidth Transducer (CBT) Loudspeaker Line Arrays for Sound Reinforcement"; Audio Engineering Society Convention 141; wrzesień 2016
14. Keele JR D. B., Button, D. J.; "Ground- plane constant beamwidth transducer (CBT) loud- speaker circular-arc line arrays"; Audio Engineering Society Convention 119, Audio Engineering Society; 2005
15. Keele JR D. B.; "Practical implementation of constant beamwidth transducer (CBT) loud-speaker circular-arc line arrays"; Audio Engineering Society Convention 115, Audio Engineering Society; 2003.
16. Keele JR D. B.; "The application of broadband constant beamwidth transducer (CBT) theory to loudspeaker arrays"; Audio Engineering Society Convention 109, Audio Engineering Society; 2000.
17. Nowak T., Dobrucki A.; „Simulation of acoustic lens influence on wavefront shaping”; Vibrations in Physical Systems, 35(1), 2024107; 2024
18. Nowak T., Dobrucki A.; „Koncepcja matrycy falowodowej do kształtowania frontu fali akustycznej”; XIX Międzynarodowe Sympozjum Nowości w Technice Audio i Wideo NTAV2022, Wrocław, 13-15/10/2022; InfoArt, strony 18-19; 2022
19. Nowak T., Kruk B.; „Praktyczna implementacja przetwornika o stałej szerokości wiązki do projektowania monitorów studyjnych”; Postępy badań w inżynierii dźwięku i obrazu; Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej; 2021
20. Opieliński K.; „Zastosowanie transmisji fal ultradźwiękowych do charakteryzowania i obrazowania struktury ośrodków biologicznych”; Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2011
21. Polski Komitet Normalizacyjny; „Urządzenia systemów elektroakustycznych, Część 5: Głośniki”; Polska Norma PN-EN 60268-5; kwiecień 2005
22. Ureda S. Mark "Pressure Response of Line Sources"; Audio Engineering Society Convention 113; październik 2002
23. Yong Li, Gaokun Yu, Bin Liang, Xinye Zou, Guangyun Li, Su Cheng & Jianchun Cheng; „Three-dimensional Ultrathin Planar Lenses by Acoustic Metamaterials”; Scientific Reports volume 4, Article number: 6830; 2015
24. Żyszkowski Z.; „Podstawy elektroakustyki”; WNT; 1984