

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**



Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Katedra Elektroniki

PRACA DYPLOMOWA
Inżynierska

Temat: Soundtracing w grach komputerowych

Soundtracing in computer games

Imię i nazwisko: Paulina Bugiel
Kierunek studiów: Inżynieria Akustyczna

Opiekun pracy: dr inż. Bartosz Ziółko

Kraków, dn.....

Imię i nazwisko: Paulina Bugiel

Nr albumu: 219536

Kierunek studiów: Inżynieria Akustyczna

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, świadoma odpowiedzialności karnej za poświadczanie nieprawdy, że niniejszą inżynierską pracę dyplomową wykonałam osobiście i samodzielnie oraz nie korzystałam ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

.....
Podpis dyplomanta

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Kierunek: Inżynieria Akustyczna

Paulina Bugiel

Praca dyplomowa inżynierska

Opiekun: dr inż. Bartosz Ziółko

STRESZCZENIE

Celem niniejszej pracy jest stworzenie symulatora akustyki pomieszczenia przeznaczonego do testowania algorytmów zamodelowanych zjawisk akustycznych przed ich właściwą implementacją w tworzonym silniku audio oraz przedstawienie użycia go do symulacji zjawiska odbicia dźwięku w pomieszczeniu.

Opisywany program został stworzony w środowisku MATLAB przy wykorzystaniu wiedzy z zakresu akustyki pomieszczeń, rozchodzenia się fal, geometrii czy przetwarzania sygnałów.

Część teoretyczna pracy, oprócz wiadomości z wymienionych dziedzin, przybliży również zagadnienia beamtracingu i soundtracingu, jako że tworzony silnik audio działa w oparciu o te metody.

Część projektowa jest opisem tworzenia programu, zawierającym proces generowania filtrów o skończonej odpowiedzi impulsowej na podstawie właściwości akustycznych materiałów w modelowanym pomieszczeniu, użycie zewnętrznego oprogramowania do śledzenia ścieżek propagacji fali dźwiękowej oraz składanie docelowej odpowiedzi impulsowej pomieszczenia.

SPIS TREŚCI

1. Wstęp.....	5
1.1. Cel i zakres pracy.....	5
2. Podstawy teoretyczne.....	6
2.1. Kilka słów o udźwiękowianiu gier.....	6
2.1.1. Krótka historia dźwięku w grach.....	6
2.1.2. Udźwiękowianie gier obecnie.....	7
2.2. Czym jest soundtracing.....	7
2.2.1. Raytracing.....	7
2.2.2. Beamtracing.....	9
2.3. Propagacja fali dźwiękowej.....	10
2.3.1. Fala kulista.....	11
2.3.2. Pochłanianie przez ośrodek.....	12
2.4. Fizyka zjawiska odbicia.....	13
2.4.1. Prawo odbicia.....	13
2.4.2. Pochłanianie energii akustycznej przez materiał.....	14
2.5. Filtry FIR.....	15
2.5.1. Projektowanie filtra metodą próbkowania w dziedzinie częstotliwości.....	15
3. Symulator akustyki pomieszczenia.....	16
3.1. Zamodelowanie pojedynczego odbicia.....	16
3.1.1. Związek pochłaniania z charakterystyką filtra.....	16
3.1.2. Rozszerzenie pasma charakterystyki częstotliwościowej.....	17
3.1.3. Interpolacja charakterystyki.....	18
3.2. Stworzenie modelu pomieszczenia w programie CATT Acoustic.....	20
3.3. Implementacja odbić w środowisku MATLAB.....	21
3.4. Uwzględnienie dodatkowych zjawisk.....	23
3.4.1. Pochłanianie dźwięku przez atmosferę.....	23
3.4.2. Spadek poziomu dźwięku z odległością.....	25
3.5. Rozbudowanie programu.....	26
3.5.1. Dodanie odbić trzeciego rzędu.....	26
3.5.2. Dodanie ogona pogłosowego.....	27
3.6. Prezentacja odpowiedzi impulsowych.....	28
3.7. Schemat blokowy działania programu.....	31
4. Zakończenie i wnioski.....	32
4.1. Plany dalszego użycia programu.....	32
4.2. Podsumowanie.....	32
5. Bibliografia.....	33

1. WSTĘP

Gry komputerowe i konsolowe od wielu lat stanowią ogromną część rynku multimedialnych. Rzesza odbiorców jest szeroka i nierzadko bardzo wymagająca. Gracze pragną doświadczać coraz bardziej realnego świata wirtualnego. Realnego, czyli stymulującego wszystkie zmysły. Obecnie każde ulepszenie sposobu przekazu wiąże się z koniecznością zakupu drogiego sprzętu, jednak ogromne możliwości leżą wciąż w ulepszaniu algorytmów sterujących dostępnym już sprzętem. Niniejsza praca jest efektem udziału w przedsięwzięciu mającym na celu stworzenie silnika audio do gier bazującego na tym właśnie założeniu.

1.1. Cel i zakres pracy

Praca ta powstaje jako część tworzenia silnika audio do gier komputerowych stworzonego przez zespół studentów i pracowników AGH w ramach projektu RAYAV. Autor przedstawia w niej wyłącznie wyniki swojej własnej pracy.

Celem niniejszej pracy jest stworzenie symulatora akustyki pomieszczenia przeznaczonego do testowania zamodelowanych zjawisk akustycznych przed ich właściwą implementacją w tworzonym silniku audio oraz przedstawienie użycia go do symulacji zjawiska odbicia dźwięku w pomieszczeniu.

W rozdziale 2 znajdują się podstawy teoretyczne wykorzystane przy pisaniu symulatora. Zagadnienie komputerowego modelowania akustyki czerpie wiedzę z kilku dziedzin dlatego niezbędne jest przedstawienie dość obszernej, różnorodnej teorii. W rozdziale tym znajduje się historia i przybliżenie procesu udźwiękowania gier, opis soundtracingu, sposób charakteryzacji i propagacji fali dźwiękowej, przedstawienie zjawiska odbicia oraz opis i metoda projektowania filtra FIR.

Rozdział 3 zawiera opis tworzenia symulatora, na który składa się kilka etapów, a mianowicie modelowanie pojedynczego odbicia, tworzenie modelu symulowanego pomieszczenia, implementacja w programie MATLAB z uwzględnieniem zjawisk towarzyszących propagacji dźwięku oraz wpływ ogona pogłosowego.

Rozdział 4 obejmuje wnioski dotyczące pisanego programu, jego wady i zalety oraz plany dalszego użycia, jako że symulator jest tworzony na potrzeby trwającego projektu, i istnieje możliwość rozbudowania go wykorzystania do dalszych zadań.

W rozdziale 5 znajduje się użyta bibliografia obejmująca książki i artykuły naukowe.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE

2.1. Kilka słów o udźwiękowianiu gier

2.1.1. Krótka historia dźwięku w grach

Początki gier wideo sięgają lat 50 XX wieku, jednak pierwszą grą na automaty, która przypomina to co znamy pod pojęciem gier komputerowych, był *Pong* wydany przez firmę Atari w 1972 roku. Gra ta posiadała prosty podzespół z głośnikiem emitującym dźwięki. Sukces ponga przyczynił się do rozwoju rynku gier na automaty, a wkrótce również do pojawienia się pierwszych domowych konsoli podłączanych do telewizora, przeznaczonych do odtwarzania gier 8-bitowych. Dźwięki w tych grach były bardzo prymitywne, ale były już zapisane w domenie cyfrowej, a nie analogowej, tak jak wcześniej. Z biegiem czasu pojawiła się polifonia, zaczęto adaptować znane utwory do wykorzystania jako ścieżki dźwiękowe. W latach 80, z pojawieniem się Commodore Amiga i zwiększeniem ilości bitów, znacznie poprawiła się jakość syntezowanego dźwięku. Wkrótce powstał również system MIDI. Lata 90 przyniosły rewolucję. Duża pojemność dysku CD umożliwiła zapis długich ścieżek dźwiękowych o wysokiej jakości. Od tego momentu udźwiękowianie gier komputerowych przyjęło formę, która jest stosowana do dziś.

Obecnie dominującym sposobem tworzenia dźwięku w grach jest po prostu nagrywanie odpowiednich plików audio i umieszczanie ich w wyznaczonych miejscach w grze. Tłem mogą być utwory jednego lub kilku kompozytorów wykonywane przez muzyków i wokalistów, bądź syntezowane na komputerze. Podobnie rzecz ma się w przypadku efektów np. dźwięków walki, kroków itd. Proces nagrywania próbek dźwiękowych wygląda podobnie jak w przypadku nagrywania płyty audio w studiu nagraniowym. Każdy plik musi zostać zarejestrowany sprzętem wysokiej klasy w odpowiednich warunkach, jak najbardziej odpowiadających tym w świecie tworzonej gry. Po nagraniu następuje etap edycji i post processingu, aby efekty były spójne i zajmowały możliwie jak najmniej pamięci.

Przedstawiony wyżej proces ma poważną wadę. Mianowicie, po nagraniu efekty dźwiękowe można poddać już tylko bardzo znikomej obróbce, np. przyciszyć cały dźwięk bądź przytłumić pewne pasmo częstotliwości lub zmienić jego położenie w panoramie stereo. W dobie obrazu i dźwięku HD oraz gier o bardzo realistycznej grafice, taki sposób odtwarzania dźwięku staje się coraz wyraźniej niedoskonały. Aby

poprawić jego wady należy więc stworzyć nowe rozwiązania. Obiecujący w tej dziedzinie jest soundtracing, który jest przedmiotem niniejszej pracy inżynierskiej.

2.2. Czym jest soundtracing

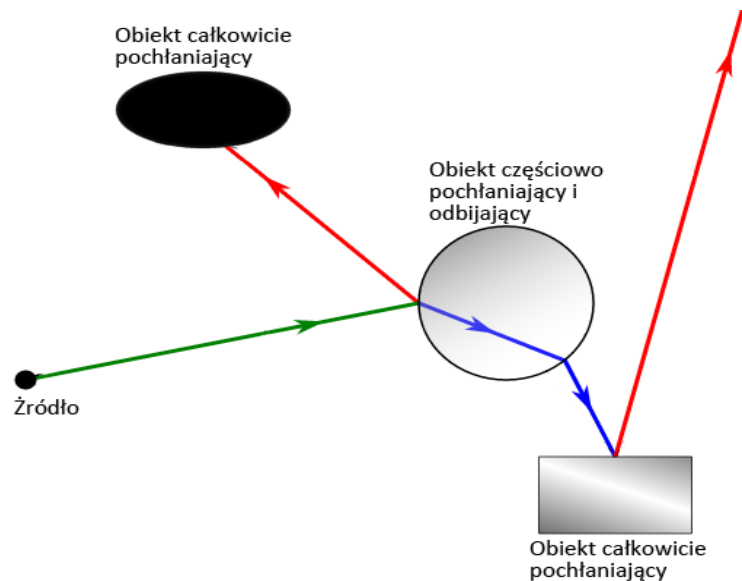
Soundtracing jest to wykorzystanie metod śledzenia promieni (raytracing), bądź ich wiązek (beamtracing), przy generacji dźwięku. Oznacza to, że w scenie, w której projektujemy dźwięk mamy do dyspozycji jedno lub więcej źródeł, odbiornik, czyli nasze uszy oraz wszelkie informacje na temat geometrii sceny, materiałów w niej występujących czy znajdujących się tam obiektów. Na podstawie tych danych możemy obliczyć jaki powinien być dźwięk dochodzący do odbiornika, zależnie od tego jakie parametry ma scena. Przykładowo, jeśli stoimy naprzeciw głośnika w małym pokoju, gdzie znajduje się dużo mebli, ozdób na ścianach oraz gruby dywan na podłodze, to dochodzący do nas dźwięk będzie pozbawiony pogłosu, nieco uwydatnione będą niskie częstotliwości, a przytłumione wysokie. Nie będziemy mieli również problemu ze zlokalizowaniem położenia głośnika po zamknięciu oczu. Z drugiej strony, jeśli znajdziemy się naprzeciw tego samego głośnika w długim szkolnym korytarzu o gołych ścianach i wykafelkowanej podłodze, gdzie dodatkowo między nami a źródłem znajdzie się jakaś przeszkoda to dźwięk będzie zupełnie inny. Pojawi się duży pogłos, a niskie częstotliwości zostaną zdominowane przez wysokie. Również po zamknięciu oczu będziemy nieco zdezorientowani nie mogąc określić skąd dochodzi do nas dźwięk. Dzięki soundtracingowi możliwe jest zamodelowanie tych wszystkich zjawisk i uwzględnienie ich w procesie udźwiękowania gier komputerowych.

2.2.1. Raytracing i beamtracing

Raytracing polega na śledzeniu promieni, które są emitowane ze źródła i propagują w przestrzeni napotykając na swojej drodze przeszkody. Przeszkody te mogą powodować odbicie lustrzane, przejście na drugą stronę przeszkody, załamanie przy przejściu do innego ośrodka bądź dyfrakcje. To jakie zjawisko będzie miało miejsce zależy od właściwości materiału z jakiego zbudowana jest przeszkoda. Jeśli jest ona częściowo pochłaniająca, częściowo odbijająca i dodatkowo częściowo przezroczysta to energia promienia podzieli się na trzy porcje, z których jedna zostanie odbita, druga rozproszona w strukturze materiału a trzecia przejdzie na drugą stronę. W konsekwencji jeden promień padający podzieli się na dwa promienie, a te z kolei będą dalej

propagować w przestrzeni aż napotkają kolejne przeszkody lub zostaną zaniedbane jeśli ich energia spadnie poniżej ustalonego progu. Promienie mogą być reprezentacją światła, dźwięku, fal elektromagnetycznych itp.

W przypadku światła, skutkiem padania promieni na obiekt częściowo odbijający może być zmiana koloru, natomiast w przypadku dźwięku – zmiana brzmienia. Obie te zmiany są skutkiem modyfikacji charakterystyki częstotliwościowej oryginalnego promienia.



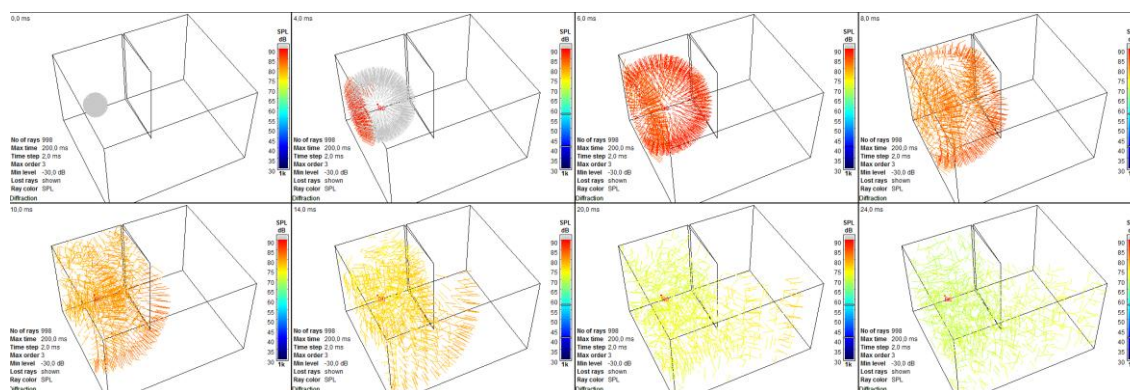
Rys. 2.1. Przykładowe śledzenie pojedynczego promienia

Najczęściej śledzenie promieni kojarzy się ze światłem ponieważ generowanie bardzo realistycznych obrazów jest najpopularniejszym wykorzystaniem raytracingu. Obecnie często stosuje się tę metodę jako pomocniczą dla rasteryzacji do renderowania realistycznych odbić w obiektach takich jak lustra lub karoseria samochodu. Wiele firm dąży również do generowania obrazów techniką raytracingu w czasie rzeczywistym.



Rys. 2.2. Obraz wyrenderowany techniką raytracingu

Raytracing jest również używany w programach do projektowania akustyki pomieszczeń takich jak CATT Acoustic. W programie tym użytkownik wprowadza geometrię pomieszczenia zamkniętego razem z informacjami o użytych materiałach. Program liczy takie parametry jak czas pogłosu czy zrozumiałość mowy w dowolnych punktach pomieszczenia i dowolną liczbą i ustawieniem źródeł dźwięku, dzięki śledzeniu promieni emitowanych ze źródeł.

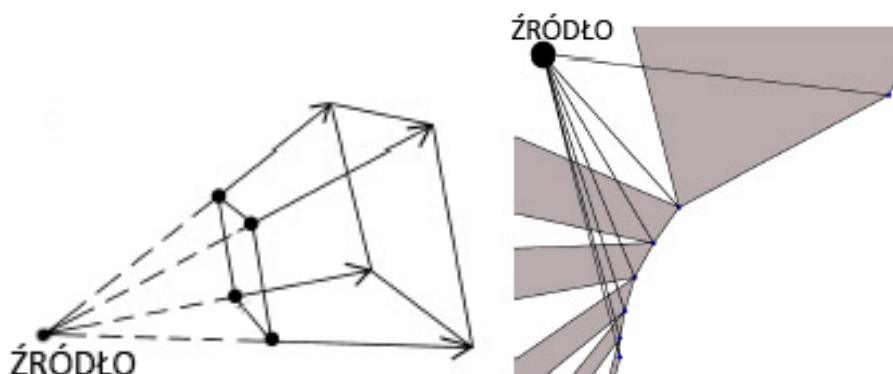


Rys. 2.3. Przykład śledzenia promieni w CATT Acoustic

2.2.2. Beamtracing

Beamtracing jest metodą bardzo podobną do raytracingu, z tym że nie śledzi się promieni ale ich wiązki w postaci stożków lub ostrosłupów. Dzięki temu żaden element nie może zostać pominięty w trakcie śledzenia, ponieważ wiązki pokrywają całą geometrię sceny. W przypadku śledzenia promieni, z których każdy pada na najmniejszą przyjętą jednostkę powierzchni, niektóre elementy mogą zostać pominięte, jeżeli żaden promień w nie nie trafi. Powoduje to pojawienie się szumu bądź nawet ‘dziur’ w obrazie bądź niedokładności w odwzorowaniu akustyki. Aby tego uniknąć trzeba wypuszczać ze źródła bardzo duże ilości promieni co powoduje długi czas obliczeń. W przypadku beamtracingu problem szumu nie występuje, pojawia się za to problem generalizacji obiektów. Jest to spowodowane tym, że wiązka oddalając się od źródła pada na coraz większą powierzchnię i może pomijać szczegóły lub nieregularności kształtu obiektów na jakie pada. Przykładowo jeśli wiązka padnie np. na zakratowane okno, krata i okno mogą zostać potraktowane jako nie dwa, a jeden obiekt o parametrach średnich. Aby zniwelować ten problem stosuje się dzielenie wiązki na mniejsze gdy ta padnie na obiekt o dużej szczegółowości. W podanym przykładzie wiązka padając na kratę podzieliła by się na kilka nowych wiązek, z których część

odbiłyby się od kraty, a część ‘przeleciała’ przez nią i odbiłyby się dopiero od szyby. Oczywiście dzielenie wiązek również powoduje wydłużenie czasu obliczeń, jednak możliwe jest ustalenie granicy podziału wiązek, która może zależeć np. od aktualnego obciążenia komputera obliczeniami. Dzięki temu obraz lub dźwięk będzie mniej lub bardziej dokładny, ale zawsze będzie użyta ta sama moc obliczeniowa i nie zostaną pominięte żadne materiały występujące w scenie, dlatego beamtracing wydaje się być odpowiedniejszy dla aplikacji mających działać w czasie rzeczywistym, którymi są m.in. gry komputerowe.

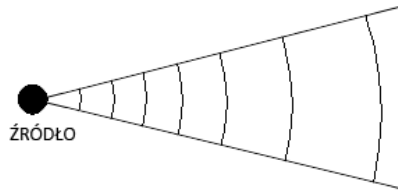


Rys. 2.4. Pojedyncza wiązka (po lewej) oraz przykład podziału wiązki przy napotkaniu obiektu o nieregularnych kształtach (po prawej).

2.3. Propagacja fali dźwiękowej

Fala dźwiękowa, do czego doszedł już I. Newton, jest niczym innym jak szybkimi zmianami ciśnienia ośrodka. Sposób propagacji fali akustycznej polega na przekazywaniu energii akustycznej przez sąsiadujące ze sobą cząsteczki ośrodka. Dzięki temu cząsteczki, wykonując tylko niewielkie ruchy wokół swojego położenia równowagi, umożliwiają przemieszczanie się fali dźwiękowej z dużą prędkością. Ponieważ drgania cząsteczek ośrodka odbywają się w kierunku propagacji, mówimy że fala akustyczna jest falą podłużną. Drugim kryterium definiującym falę akustyczną jest kształt jaki przyjmuje po wyjściu ze źródła. Ponieważ obszary o tym samym ciśnieniu tworzą kule ze środkiem w miejscu źródła, falę tą nazywamy falą kulistą.

2.3.1. Fala Kulista



Rys. 2.5. Rozchodzenie się fali kulistej

Aby dostatecznie dobrze opisać falę akustyczną, musimy znać wartość jej ciśnienia akustycznego w danym punkcie i danej chwili czasu. Jest to możliwe o ile znane są warunki początkowe oraz właściwości ośrodka. Ciśnienie akustyczne fali kulistej definiowane jest wzorem [1]:

$$p(r, t) = \frac{A}{r} \cos \left[\omega \left(t - \frac{r}{c} \right) \right] \quad (2.1)$$

gdzie:

p - ciśnienie akustyczne,

r - odległość od źródła,

t - czas,

A - amplituda,

ω - częstość kątowa ($\omega = 2\pi f$, gdzie f - częstotliwość),

c - prędkość dźwięku w ośrodku ($c = 343[m/s]$ dla powietrza).

Będzie nas również interesowało natężenie dźwięku, które z ciśnieniem oraz mocą źródła jest związane następującymi zależnościami [1]:

$$I = \frac{p_{sk}^2}{Z} \quad (2.2)$$

gdzie:

p_{sk} - wartość skuteczna ciśnienia akustycznego,

Z - impedancja akustyczna.

$$I(r) = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (2.3)$$

gdzie:

W - moc źródła

Należy jeszcze zwrócić uwagę, że poziom natężenia i ciśnienia akustycznego, wyrażony w decybelach, oblicza się ze wzorów:

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) [dB] \quad (2.4)$$

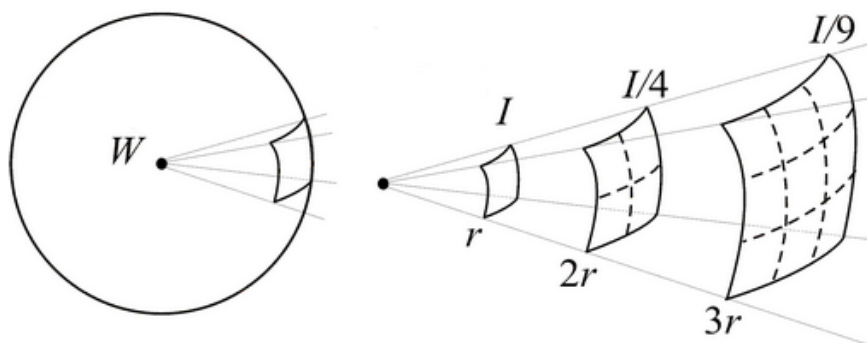
$$L_p = 10 \log \left(\frac{\langle p^2 \rangle}{p_0^2} \right) = 20 \log \left(\frac{p_{sk}}{p_0} \right) [dB] \quad (2.5)$$

gdzie:

I_0 - wartość odniesienia natężenia, wynosząca $10^{-12} [W/m^2]$,

p_0 - ciśnienie odniesienia, wynoszące $2 \cdot 10^{-5} [Pa]$.

Z powyższych zależności widać, że spadek poziomu natężenia i ciśnienia dźwięku na jednostkę powierzchni sfery przy podwojeniu odległości od źródła wynosi 6dB.



Rys. 2.6. Zobrazowanie spadku natężenia dźwięku z odległością [2]

2.3.2. Pochłanianie przez ośrodek

Część energii dźwiękowej jest tracona w trakcie propagacji w wyniku tarcia cząsteczek ośrodka. Pochłanianie dźwięku zależy zatem od lepkości ośrodka i jego przewodnictwa cieplnego. Zależność spadku natężenia od odległości przebytej przez dźwięk w powietrzu można określić za pomocą wzoru [3]:

$$I(x) = I_0 e^{-mx} \quad (2.6)$$

gdzie:

I_0 - natężenie dźwięku w miejscu początkowym,

m - współczynnik pochłaniania dźwięku przez powietrze.

Wartości współczynnika m są wyznaczane doświadczalnie i dostępne w formie tabelarycznej w ośmiu pasmach oktawowych od 62,5Hz do 8kHz, w zależności od temperatury i wilgotności.

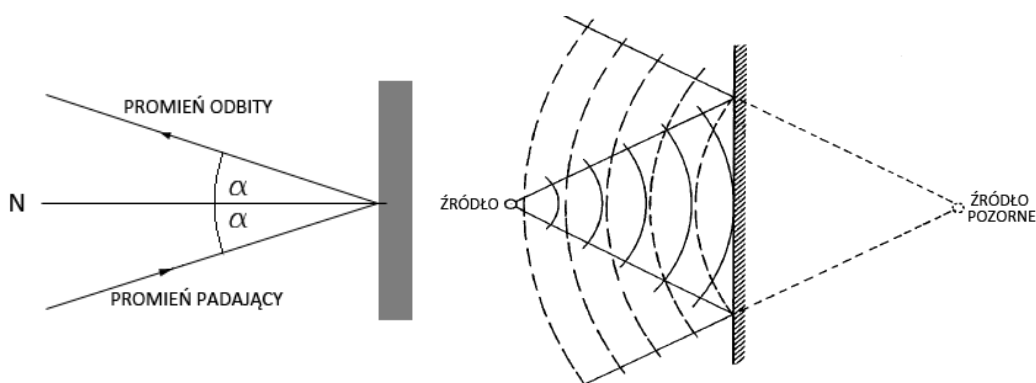
2.4. Fizyka zjawiska odbicia

Zjawisko odbicia zachodzi gdy fala, czy to świetlna, akustyczna czy elektromagnetyczna, pada na powierzchnię odbijającą. Gdy jest to powierzchnia całkowicie odbijająca to cała energia fali padającej zostanie odbita, a gdy powierzchnia jest częściowo odbijająca, tylko część energii zostanie odbita. Dwa aspekty jakie należy tutaj rozważyć to kierunki fali padającej i odbitej od przeszkody oraz jej charakterystyka częstotliwościowa.

2.4.1. Odbicie lustrzane

Odbicie lustrzane dźwięku zachodzi gdy fala pada na gładką powierzchnię, czyli taką, której nieregularności są dużo mniejsze od długości fali. Podobnie światło odbija się od lustra, mimo że nie jest ono nieskończenie doskonałe i posiada pewną chropowatość, jednak 'niewidoczną' dla światła.

Odbicie lustrzane zachodzi według prawa odbicia, które mówi, że kąt odbicia jest równy kątowi padania, a promień padający, promień odbity i normalna do powierzchni odbicia leżą w jednej płaszczyźnie. Kąt padania to kąt między promieniem padającym, a normalną do powierzchni, natomiast kąt odbicia to kąt między promieniem odbitym a normalną do powierzchni.



Rys. 2.7. Po lewej: zobrazowanie zjawiska odbicia na płaszczyźnie, po prawej - odbicie lustrzane fali dźwiękowej [5].

2.4.2. Pochłanianie energii akustycznej przez materiał

Pochłanianie energii akustycznej zachodzi, gdy fala dźwiękowa pada na porowaty materiał i część jej energii zostaje rozproszona wewnątrz materiału i zamieniona na ciepło. Każdy materiał pochłania w inny sposób. Niektóre materiały są bardzo skutecznymi pochłaniaczami, inne mniej, jeszcze inne pochłaniają jedne częstotliwości bardziej od innych. Charakter pochłaniania zależy od bardzo wielu czynników takich jak struktura budowy, kształt, sprężystość, sposób mocowania, grubość itd. Najczęściej stosowany jest natężeniowy współczynnik pochłaniania α mierzony w komorze pogłosowej i podawany w sześciu pasmach oktawowych dla 125, 250, 500 1000, 2000 i 4000Hz zgodnie z obowiązującymi normami.

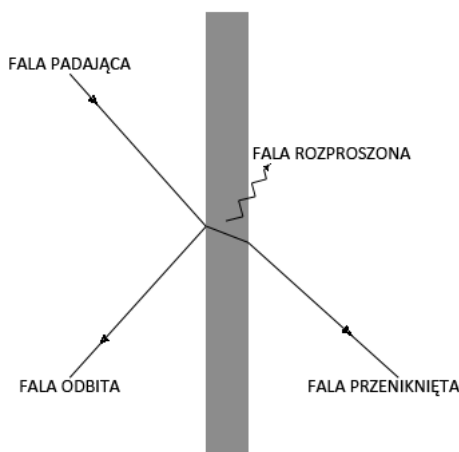
Warto również zauważyć, że definiuje się również współczynnik odbicia R , który jest miarą odbitej energii i związany jest ze współczynnikiem pochłaniania α następującą zależnością:

$$R = \sqrt{1 - \alpha} \quad (2.7)$$

Wartości współczynnika α dla materiałów powszechnie stosowanych można znaleźć bez problemu w literaturze, natomiast dla materiałów akustycznych współczynnik ten jest podawany przez producenta materiału.

Należy nadmienić również, że współczynnik α definiowany jest w literaturze jako stosunek natężenia fali, która wniknęła w strukturę materiału i fali padającej. Istnieje również współczynnik odbicia β , który jest stosunkiem natężenia fali odbitej i padającej. Oba współczynniki związane są zależnością:

$$\alpha + \beta = 1 \quad (2.8)$$



Rys. 2.8. Schemat rozchodzenia się fali napotykającej na przeszkodę.

2.5. Filtry FIR

Filtry cyfrowe o skończonej odpowiedzi impulsowej (ang. FIR – *finite impulse response*) są to filtry nierekursywne bez sprzężenia zwrotnego. Do zalet tego typu filtrów należy prostota projektowania, stabilność oraz możliwość uzyskania liniowej charakterystyki fazowej. Liniowa charakterystyka fazowa jest szczególnie ważna dla zachowania niezniekształconego sygnału po filtracji. Filtry te są stosowane m.in. w standardzie MPEG audio. Istnieje kilka metod projektowania filtrów FIR. Przedstawiona zostanie jedna z nich.

2.5.1. Projektowanie filtra metodą próbkowania w dziedzinie częstotliwości

W tej metodzie ustala się najpierw charakterystykę częstotliwościową $H(e^{j\Omega})$ filtra jaką chce się otrzymać dla N pulsacji unormowanych $\Omega_k = k \left(\frac{2\pi}{N}\right)$,

$k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, a następnie znajduje odpowiedź impulsową $h(n)$ wykonując odwrotną dyskretną transformację Fouriera z $H(e^{j\Omega})$ [6]:

$$h(n) = \sum_{k=0}^{N-1} H(k) e^{j\left(\frac{2\pi}{N}k\right)n}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (2.9)$$

gdzie:

$H(k)$ - zadane punkty charakterystyki,

N - rząd filtra.

Otrzymana odpowiedź impulsowa może posiadać zafalowania w paśmie przejściowym, lub w miejscach gdzie występują nagłe ‘skoki’ w charakterystyce. Aby ich uniknąć mnoży się odpowiedź impulsową przez wybrane okno, np. okno Hamminga określone wzorem:

$$w(n) = 0,54 - 0,46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), \quad 0 \leq n \leq N - 1 \quad (2.10)$$

3. SYMULATOR AKUSTYKI POMIESZCZENIA

Symulator akustyki pomieszczenia, którego tworzenie zostanie przedstawione w tym rozdziale, został stworzony w celu ułatwienia i przyspieszenia tworzenia silnika audio. Prace nad silnikiem odbywają się etapowo, dodając kolejne elementy jakimi są m.in. zjawiska zachodzące przy rozchodzeniu się fali akustycznej. Zjawiska te są najpierw analizowane teoretycznie, następnie modyfikowane tak, aby mogły zostać zaimplementowane w postaci kodu komputerowego. Aby zweryfikować poprawność algorytmów, są one implementowane przy użyciu programu MATLAB w opisywanym symulatorze, gdzie scena jest statyczna. Po przetestowaniu algorytmów i poprawieniu błędów, są one dopiero implementowane w docelowym kodzie C++ silnika.

3.1. Zamodelowanie pojedynczego odbicia

3.1.1. Związek pochłaniania z charakterystyką filtra

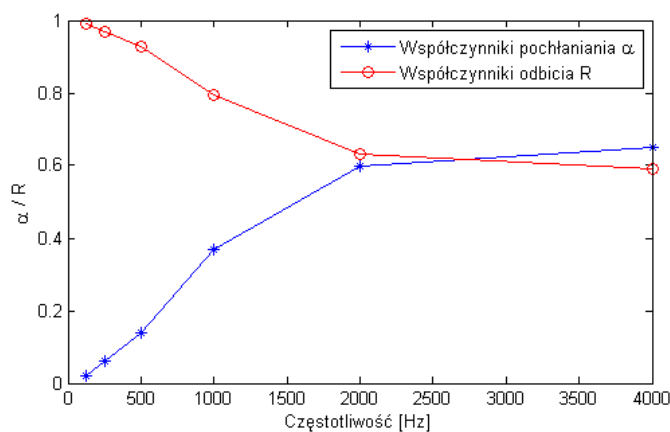
Przy odbiciu dźwięku od przeszkody, np. ściany, zmienia się charakterystyka częstotliwościowa fali akustycznej, zależnie od właściwości materiału określonych przez współczynniki pochłaniania α . Dzięki nim możliwe jest określenie ilości energii pochłoniętej przez materiał. Jednak dla słuchacza stojącego przed ścianą ważny jest poziom ciśnienia akustycznego odbitego jaki do niego dociera. Poziom ten zależy od współczynnika odbicia R , związanego ze współczynnikiem α wg wzoru (2.7).

Przykładowe współczynniki α dla materiału jakim jest gruby dywan wynoszą [7]:

$$\alpha = [0,02; 0,06; 0,14; 0,37; 0,6; 0,65] \quad (3.1)$$

Odpowiadające im współczynniki odbicia R wynoszą:

$$R = [0,9899; 0,9695; 0,9274; 0,7937; 0,6325; 0,5916] \quad (3.2)$$



Rys. 3.1. Współczynniki pochłaniania i odbicia zależnie od częstotliwości

Mamy teraz do dyspozycji sześć współczynników odbicia, które pokrywają tylko mały zakres pasma słyszalnego, a w dodatku są one określone na skali częstotliwości, której każdy kolejny punkt jest o oktawę większy od poprzedniego:

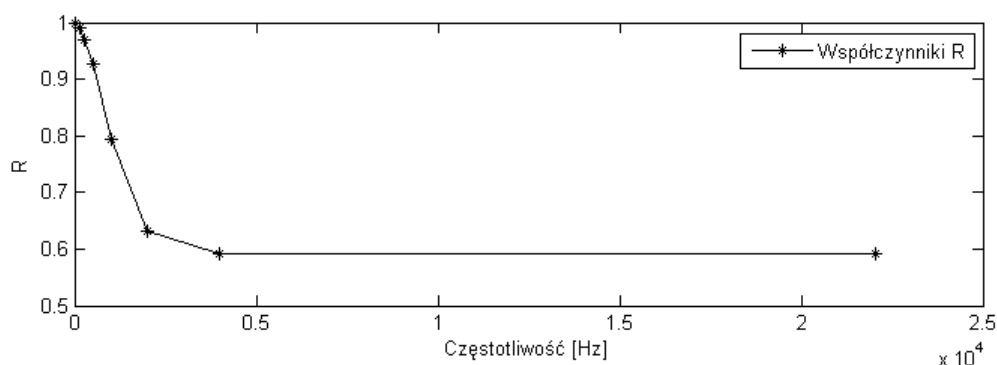
$$f = [125; 250; 500; 1000; 2000; 4000][Hz] \quad (3.3)$$

Aby współczynniki R mogły zostać użyte jako zadana charakterystyka częstotliwościowa docelowego filtra, należy rozszerzyć zakres częstotliwości od 0 do częstotliwości Nyquista oraz ustalić wartości próbek filtra dla częstotliwości pomiędzy obliczonymi współczynnikami R.

3.1.2. Rozszerzenie pasma charakterystyki częstotliwościowej

Rozszerzenie zakresu częstotliwości poniżej 125Hz, że im większa jest długość fali, tym gorsze jest pochłanianie przez jakikolwiek materiał, a dla częstotliwości 0Hz, czyli składowej stałej, którą można by interpretować jako aktualnie panujący poziom ciśnienia atmosferycznego, nie ma żadnego pochłaniania, ponieważ nie ma również dźwięku. Stąd można przyjąć, że dla 0Hz wartość filtracji będzie równa 1 i będzie dążyła liniowo do wartości w 125Hz.

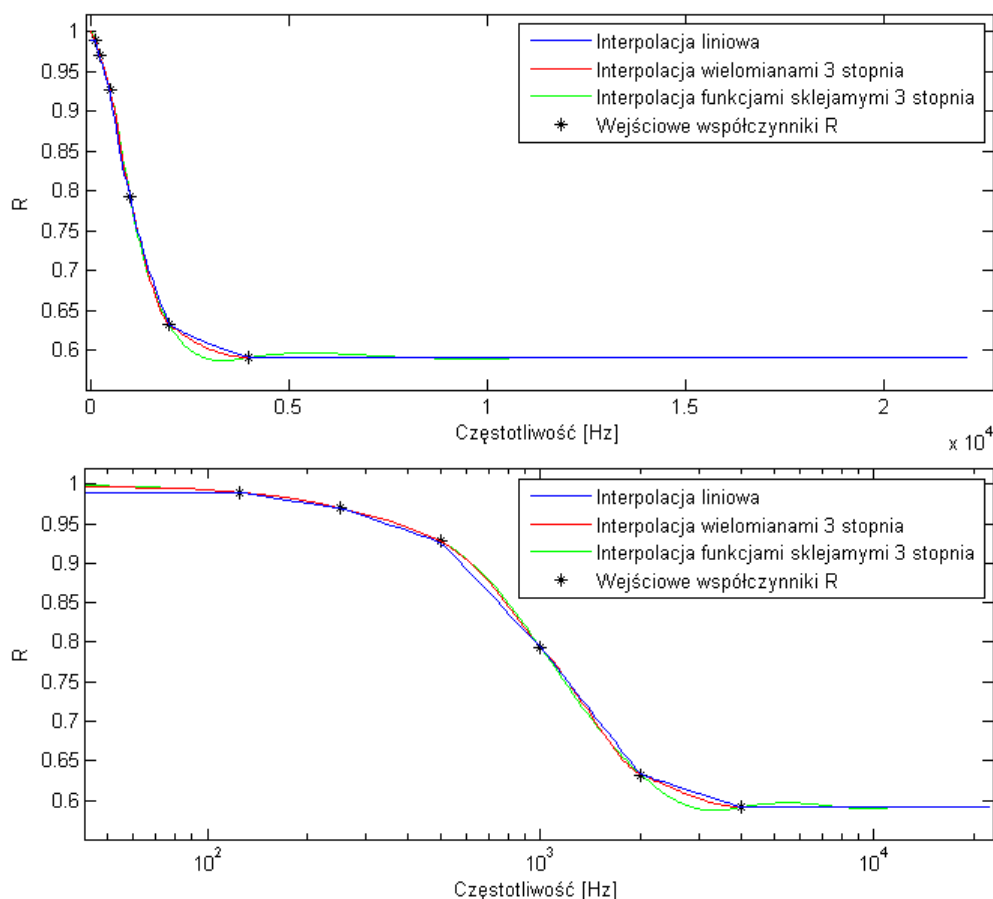
Powyżej częstotliwości 4kHz wartości współczynnika są również nieznane. Trzeba jednak zaznaczyć, że wartości α powyżej tej częstotliwości nie są mierzone ponieważ tak wysokie częstotliwości są mocno pochłaniane przez powietrze i ich zmierzenie jest niemożliwe w komorze pogłosowej. Bazując na tym fakcie oraz uwagach w [8] można przyjąć, że wartości współczynnika pochłaniania od 4kHz do częstotliwości Nyquista są takie same.



Rys. 3.2. Współczynniki odbicia po rozszerzeniu zakresu częstotliwości wg przyjętych założeń.

3.1.3. Interpolacja charakterystyki

Aby dobrze zaprojektować filtr należy odpowiednio gęsto zdefiniować punkty jego charakterystyki częstotliwościowej. Aby to zrobić zachowując dokładne wartości dostępnych współczynników R należy wybrać metodę interpolacji. Na potrzeby silnika zdecydowano się zbadać i porównać trzy metody interpolacji: liniową, wielomianami 3 stopnia oraz funkcjami sklejanymi 3 stopnia.



Rys. 3.3. Porównanie różnych metod interpolacji współczynników odbicia R. U góry – w liniowej skali częstotliwości, u dołu – w skali logarytmicznej.

Jak widać różnice między poszczególnymi interpolacjami są niewielkie. Nie są one również słyszalne co zostało przetestowane na grupie 20 osób. Testowanie obejmowało przesłuchanie plików dźwiękowych przefiltrowanych jedno i wielokrotnie filtrami uzyskanymi w wyniku trzech metod interpolacji. W związku z brakiem słyszalnych różnic zdecydowano się używać interpolacji liniowej.

Do wyznaczania wartości charakterystyki interpolowanych liniowo została napisana odrębna funkcja, która przyjmuje jako argument sześć współczynników odbicia R, ilość punktów, które ma zwrócić oraz częstotliwość próbkowania.

Kolejność operacji wykonywanych przez funkcję wygląda następująco:

Funkcja dodaje współczynniki R dla częstotliwości 62,5Hz, 8kHz, 16kHz i 32kHz według założeń przyjętych w 3.1.2.

Skala częstotliwości zostaje zastąpiona kolejnymi wartościami n gdzie

$$f(n) = f(0) \cdot 2^n, \quad f(0) = 62.5\text{Hz} \quad (3.4)$$

Przyjmując, że teraz R jest odcinkami liniowe według wzoru $R = an + b$, obliczane są wartości a i b równania liniowego

Dla dowolnej częstotliwości f_i z może zostać obliczona wartość R jako

$$R = a \cdot \log_2 \left(\frac{f_i}{f(0)} \right) + b \quad (3.5)$$

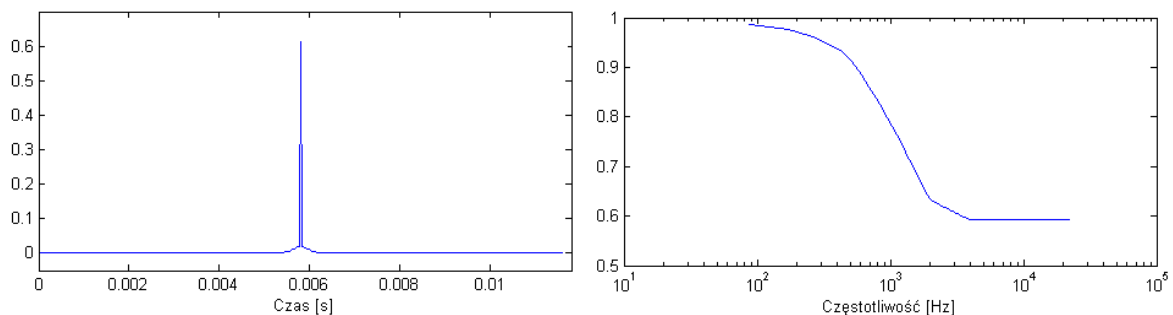
Dla filtra N -tego rzędu będzie to $M = \frac{N-1}{2}$ punktów [6].

Dla częstotliwości poniżej 62,5Hz przyjmuje się wartość wg założeń w 3.1.2.

Funkcja zwraca zadaną liczbę punktów charakterystyki dla częstotliwości od 0Hz do częstotliwości Nyquista.

Z otrzymanej charakterystyki można wyznaczyć odpowiedź impulsową filtra, który będzie symulował pojedyncze odbicie od danej przeszkody. Zdecydowano się użyć filtrów FIR o 513 współczynnikach, ze względu na liniowość fazy oraz dostatecznie dobre odwzorowanie zadanej charakterystyki. Wybór poparto również faktem, że takich filtrów używa się w standardzie MPEG audio.

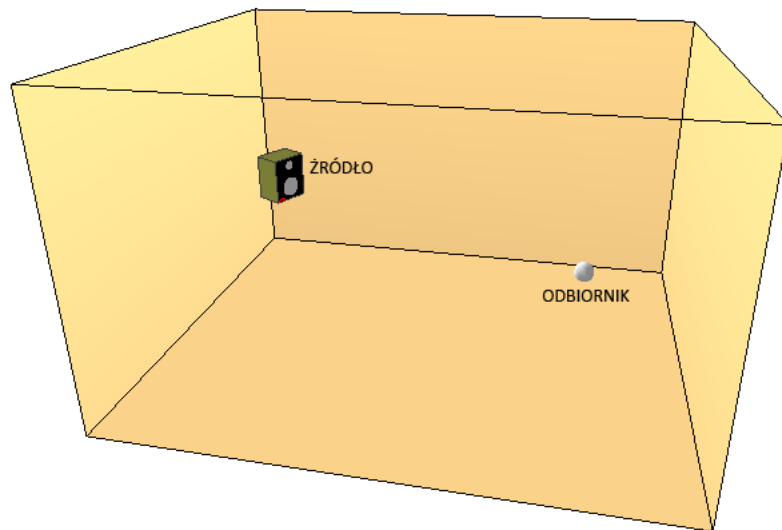
Do wyznaczenia odpowiedzi impulsowej posłużono się funkcją wbudowaną w programie MATLAB - *fir2*, która do projektowania korzysta z metody próbkowania w dziedzinie częstotliwości, opisanej w 2.5.1. oraz używa okna Hamminga, opisanego w tym samym podrozdziale.



Rys. 3.4. Odpowiedź impulsowa i charakterystyka częstotliwościowa filtra.

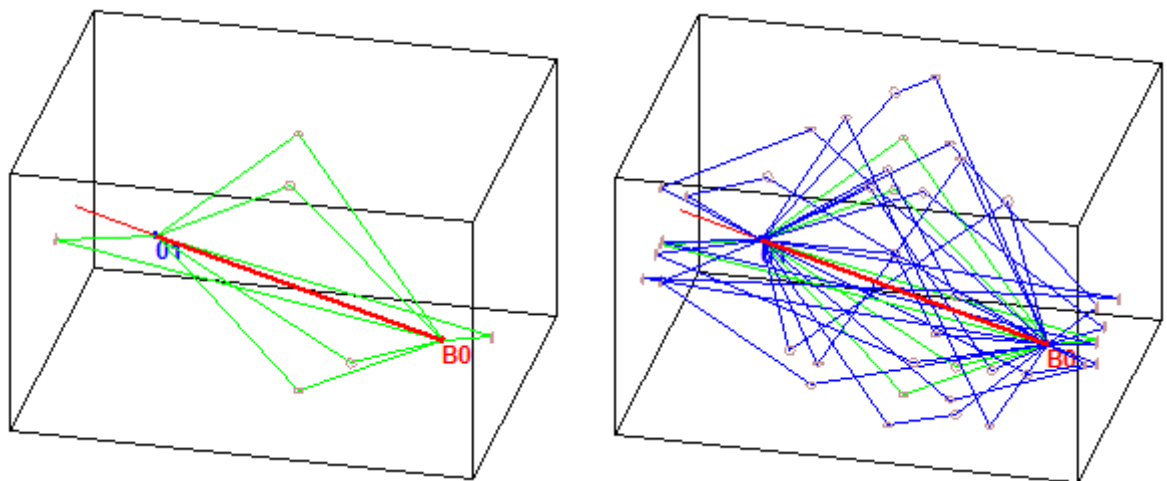
3.2. Stworzenie modelu pomieszczenia w programie CATT Acoustic.

Mając już zamodelowane pojedyncze odbicie, trzeba wiedzieć z jakim opóźnieniem dźwięk dochodzi do słuchacza po przebyciu danej ścieżki oraz ile odbić nastąpiło na tej ścieżce. Ponieważ problem wyznaczania ścieżek jest zadaniem bardzo złożonym i na nim skupia się głównie praca nad silnikiem audio, zdecydowano się użyć istniejącego już programu jakim jest CATT Acoustic. W programie tym zostało zamodelowane proste pomieszczenie o wymiarach 3x4x5m:

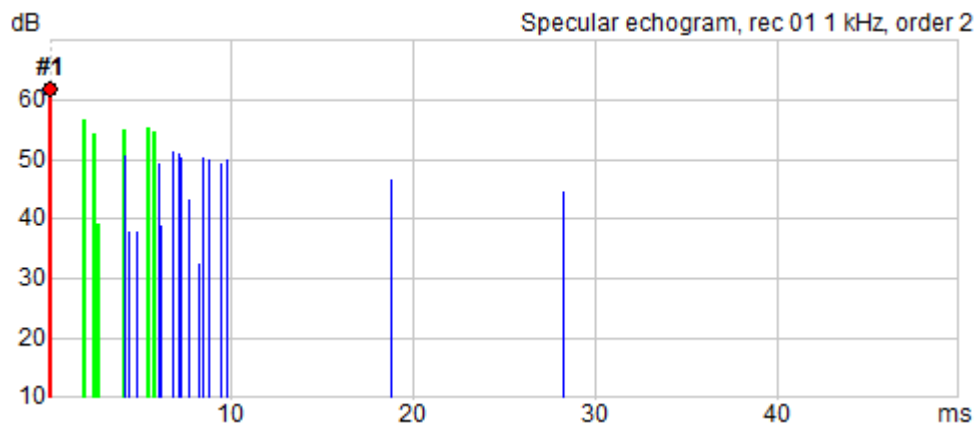


Rys. 3.5. Model pomieszczenia w CATT Acoustic

Korzystając z narzędzia do obliczania echogramu można wyświetlić ścieżki propagacji dźwięku oraz wykres z zaznaczonymi czasami opóźnień odbić do trzeciego rzędu. Do symulatora użyto odbić rzędu zerowego (dźwięk bezpośredni), pierwszego (po jednym odbiciu od ściany) i drugiego (po dwóch odbiciach).



Rys. 3.6. Zobrazowanie propagacji dźwięku. Po lewej - promienie odbić zerowego i pierwszego rzędu, po prawej - promienie odbić do drugiego rzędu.



Rys. 3.7. Echogram podający czasy w których dany promień dotarł do odbiornika (względem dźwięku bezpośredniego – czerwony prążek).

3.3. Implementacja odbić środowisku MATLAB

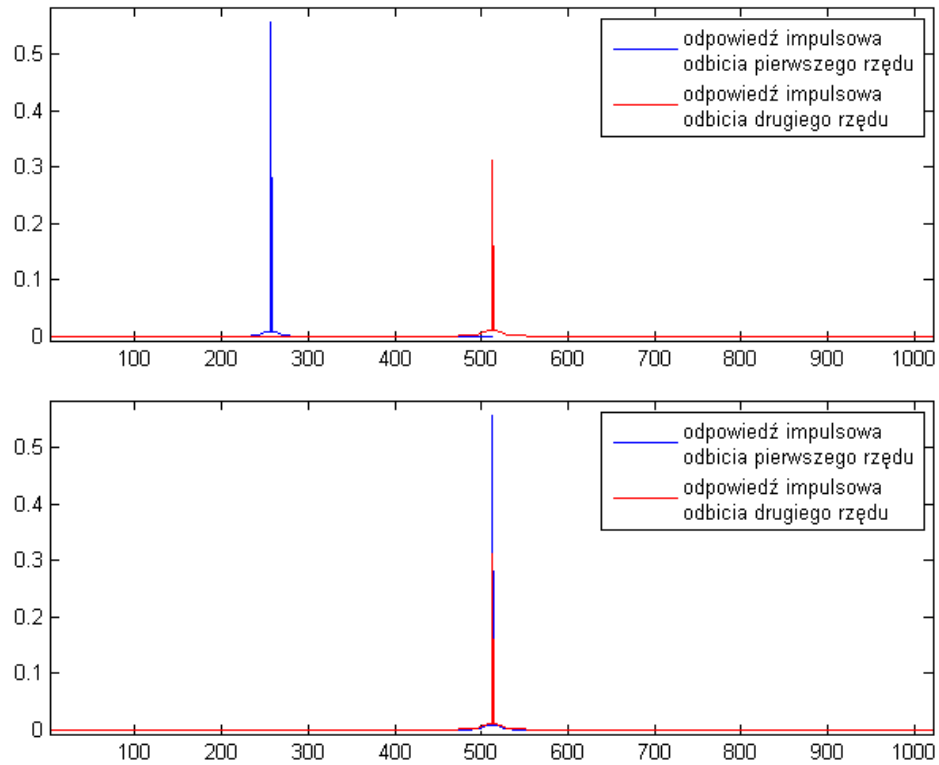
Pierwszym etapem działania programu jest interpolacja współczynników odbicia i utworzenie filtra jak opisano w 3.1. Trzeba tutaj zauważyć że wygenerowana odpowiedź impulsowa będzie odpowiednia do filtrowania jedynie plików dźwiękowych o takiej częstotliwości próbkowania, jaką podaliśmy jako argument funkcji generującej tę odpowiedź.

Pomieszczenie jakie zostało zaprojektowane na potrzeby symulatora zakłada, że wszystkie powierzchnie, czyli ściany, podłoga i sufit są pokryte tym samym materiałem, dzięki czemu można szybko zmienić właściwości pomieszczenia poprzez podstawienie nowych wartości współczynników pochłaniania.

Dla zamodelowania wielu ścieżek propagacji dźwięku, jakie przedstawiono na rys.3.6., potrzebne jest utworzenie wektora opóźnień, jakie mają miejsce pomiędzy dotarciem dźwięku z kolejnych ścieżek do słuchacza. Dane te zostały odczytane z echogramu na rys. 3.7. i zapisane w postaci dwóch wektorów, jednego dla odbić pierwszego rzędu i drugiego dla odbić drugiego rzędu.

Dla odbić pierwszego rzędu mamy już gotowy filtr, nazwijmy go h_1 , jednak dla odbić drugiego rzędu, gdzie następują dwa odbicia od dwóch ścian, należy wygenerować nowy filtr, h_2 , będący splotem dwóch odpowiedzi impulsowych utworzonych wcześniej.

Ponieważ splot dwóch odpowiedzi impulsowych o długości N próbek każda powoduje że wynikowa odpowiedź ma $2N - 1$ próbek, konieczne jest opóźnienie wszystkich odpowiedzi h_1 o $\frac{N}{2} - 1$ próbek.



Rys. 3.8. U góry - odpowiedzi impulsowe odbić pierwszego i drugiego rzędu bez przesunięcia, u dołu - te same odpowiedzi po przesunięciu o 256 próbek.

Następnym etapem było przeliczenie opóźnień czasowych na próbki, wg wzoru:

$$d = t_{op} \cdot f_s \quad (3.6)$$

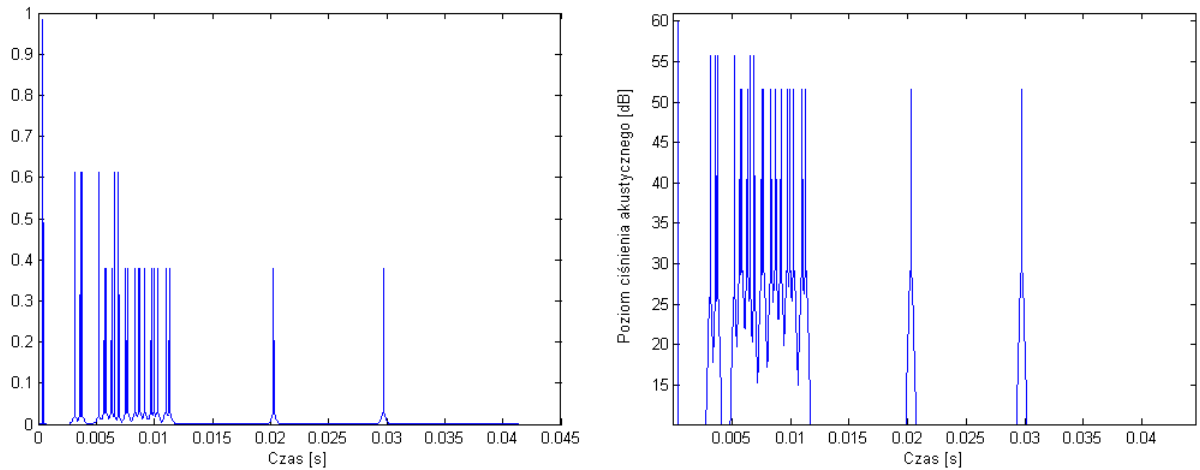
gdzie:

d - opóźnienie w próbkach,

t_{op} - opóźnienie w [s],

f_s - częstotliwość próbkowania.

Ostatecznie należało dodać do siebie poprzesuwane w czasie odpowiedzi impulsowe poszczególnych ścieżek aby uzyskać wynikową odpowiedź pomieszczenia.



Rys. 3.9. Odpowiedź pomieszczenia. Po lewej - w skali liniowej, po prawej - w skali decybelowej.

3.4. Uwzględnienie dodatkowych zjawisk

Uzyskana odpowiedź pomieszczenia obejmuje jak do tej pory tylko pochłanianie dźwięku przez materiał na który pada fala. Wraz z odległością od źródła poziom ciśnienia spada jednak na skutek zjawisk opisany w 2.3.

3.4.1. Pochłanianie dźwięku przez atmosferę

Z tabeli współczynników pochłaniania przez powietrze znalezionej w [9], wybrano zestaw współczynników dla 40% wilgotności i 20°C, czyli możliwie dobrze odwzorowujących warunki pokojowe. Współczynniki te wynoszą dla zakresu częstotliwości od 125Hz do 4kHz:

$$m = [0,4; 1,3; 2,8; 4,9; 11; 34] \text{ [dB/km]} \quad (3.7)$$

Aby uzyskać odległość jaką przebyła fala dźwiękowa od źródła do odbiornika, należało przeliczyć czas opóźnienia dotarcia dźwięku na metry wg wzoru:

$$s = (t_{op} \cdot c) + d_{bezp} \quad (3.8)$$

gdzie:

s – droga przebyta przez falę w [m],

t_{op} - czas opóźnienia względem dźwięku bezpośredniego,

c - prędkość dźwięku w powietrz równa 343[m/s],

d_{bezp} - odległość jaką przebywa dźwięk bezpośredni.

Na podstawie powyższego należało obliczyć jaki będzie faktyczny spadek poziomu ciśnienia akustycznego jako:

$$L_{tlum} = -m \cdot \frac{s}{1000} [dB] \quad (3.9)$$

Poziom tłumienia ma ujemną wartość ponieważ interesuje nas spadek mierzony w decybelach.

Następnie należało wyznaczyć współczynniki tłumienia α odpowiadające obliczonemu tłumieniu. Warstwa powietrza traktowana jest więc jak kolejna przeszkoda. Aby wyznaczyć te współczynniki ważnym na tym etapie jest zastanowienie się czym faktycznie jest tłumienie dźwięku przez powietrze. Posługując się rysunkiem 2.8 można stwierdzić, że poziom dźwięku jaki dociera do słuchacza jest to poziom fali odbitej od przeszkody jaką są cząsteczki powietrza. Poziom ten jest pomniejszony o L_{tlum} względem fali padającej. Zatem:

$$L_{tlum} = L_{pad} - L_{odb} \quad (3.10)$$

$$L_{tlum} = 10 \log \frac{I_{pad}}{I_{odb}}$$

$$10^{0,1 \cdot L_{tlum}} = \frac{I_{pad}}{I_{odb}} = \beta$$

gdzie:

L_{tlum} - poziom tłumienia,

L_{pad} , I_{pad} - poziom i natężenie fali padającej,

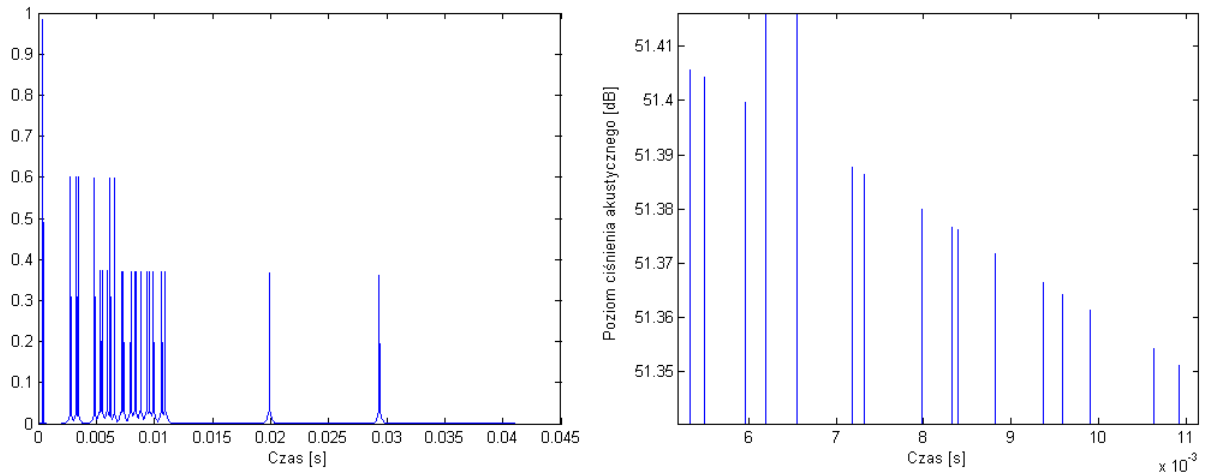
L_{odb} , I_{odb} - poziom i natężenie fali odbitej,

β - współczynnik odbicia wg (2.8).

Ze wzorów (3.8) – (3.9) można użyć do obliczenia współczynnika pochłaniania wg równania (2.8):

$$\alpha = 1 - 10^{0,1 \cdot (-m \cdot \frac{s}{1000})} \quad (3.11)$$

Powyższe równanie zostało zaimplementowane w symulatorze jako osobna funkcja. Jednak w pomieszczeniu tak małym jak to przeznaczone do testów, pochłanianie przez atmosferę ma znikomy wpływ, jednak przy większych obiektach, a szczególnie w przestrzeni otwartej odgrywa ono dużą rolę, szczególnie jeśli chodzi o pochłanianie wysokich częstotliwości.



Rys. 3.10. Po lewej - odpowiedź pomieszczenia z uwzględnieniem pochłaniania dźwięku przez atmosferę. Po prawej – ta sama odpowiedź w skali decybelowej, w przybliżeniu.

3.4.2. Spadek poziomu dźwięku z odległością

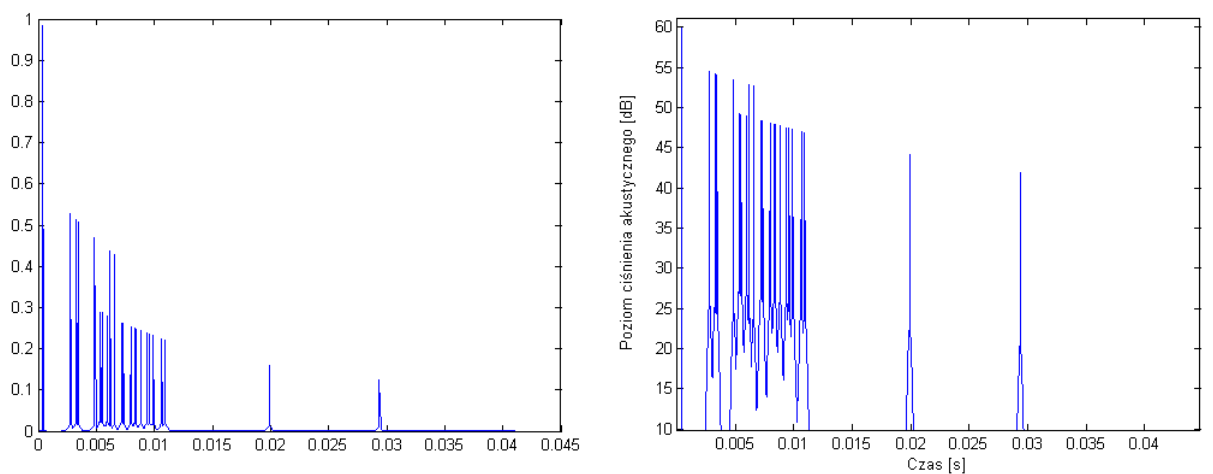
Spadek poziomu natężenia i ciśnienia wynosi 6dB na każde podwojenie odległości, a ze wzorów (2.2) – (2.5) widać, że przy podwojeniu odległości natężenie maleje czterokrotnie a ciśnienie akustyczne dwukrotnie. Należy jednak przyjąć pewną odległość odniesienia. W przypadku symulatora przyjęto 1m, zatem:

$$\gamma = \frac{1}{s} \quad (3.12)$$

gdzie:

s – droga przebyta przez falę w [m],

γ - współczynnik tłumienia związany z odległością.



Rys. 3.11. Odpowiedź pomieszczenia uwzględniająca pochłanianie dźwięku przez powietrze i tłumienie z odległością od źródła. Po lewej - w skali liniowej, po prawej - w skali decybelowej.

3.5. Rozbudowanie programu

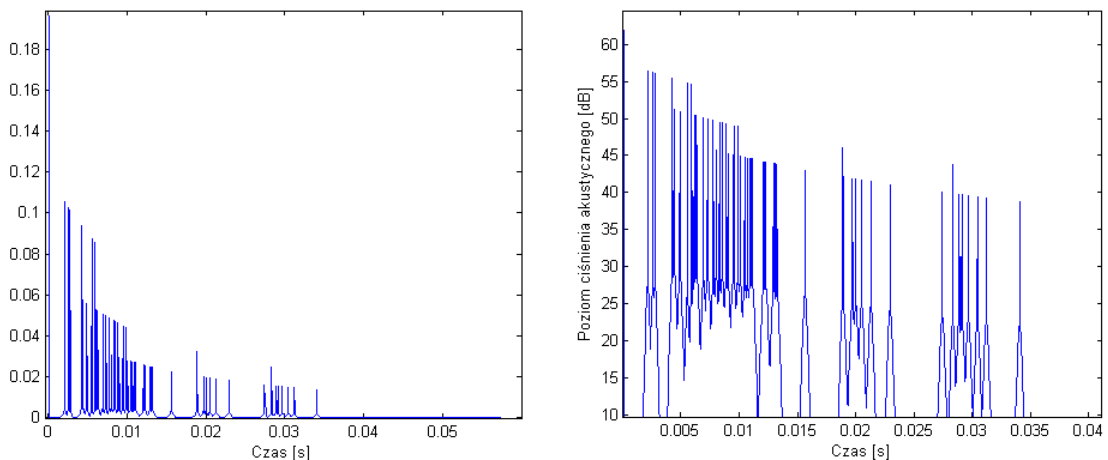
Na obecnym etapie program jest gotowy. Dostępne źródła i opinie osób zajmujących się modelowaniem akustyki sugerują, że odbicia wyższego rzędu są słabo słyszalne i implementowanie ich daje niewielką poprawę wiarygodności i jakości symulacji, przy wydłużeniu czasu obliczeń. Ogon pogłosowy natomiast daje słyszalne różnice dla niektórych materiałów wchodzących w skład pomieszczenia, co zostanie opisane w niniejszym podrozdziale.

3.5.1. Dodanie odbić trzeciego rzędu

Dodanie kolejnego odbicia sprowadza się do wpisania trzeciego wektora zawierającego czasy opóźnień dotarcia dźwięku do odbiornika, i utworzenie filtra reprezentującego odbicia trzeciego rzędu poprzez splot trzech odpowiedzi impulsowych materiału pokrywającego powierzchnie pomieszczenia.

Dodawany wektor zawiera 35 elementów, podczas gdy zaimplementowane już wektory dla odbić pierwszego i drugiego rzędu odpowiednio 6 i 16 elementów. Wynika stąd znaczne wydłużenie czasu obliczeń. Nie jest ono mocno zauważalne dla programu działającego statycznie, jednak w czasie rzeczywistym w docelowym silniku dołożenie tak dużej ilości obliczeń mogłoby znacznie spowolnić działanie.

Porównując nagrania z dodaną odpowiedzią impulsową pomieszczenia z odbiciami drugiego i trzeciego rzędu, słyszalna różnica nie jest duża, jednak zwiększenie rzędu odbić daje wrażenie poprawy jakości dźwięku, który zdaje się być bardziej naturalny w tym drugim przypadku.



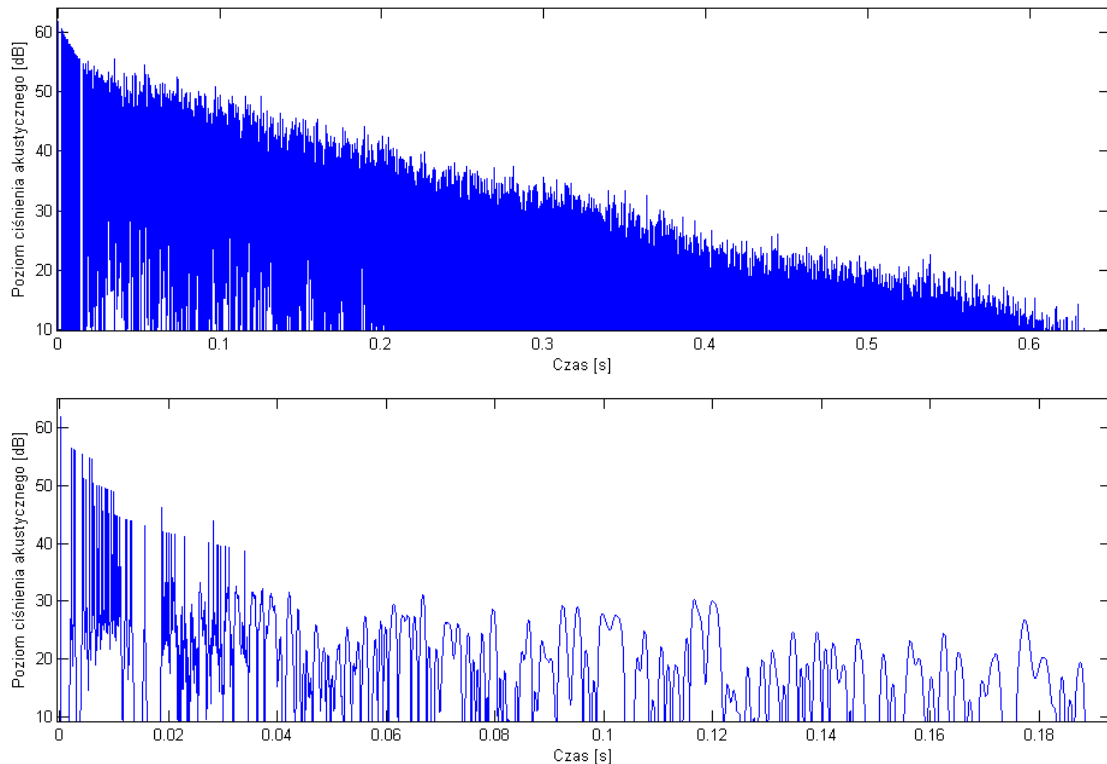
Rys. 3.12 Odpowiedź pomieszczenia uwzględniająca odbicia trzeciego rzędu. Po lewej - w skali liniowej, po prawej - w skali decybelowej.

3.5.2. Dodanie ogona pogłosowego

Zagadnienie ogona pogłosowego jest tematem innego zadania inżynierskiego, jednak nie sposób nie wspomnieć o nim przy opisie symulatora ponieważ ogon pogłosowy stał się ważną częścią programu w trakcie jego rozwoju będąc kolejną funkcją wchodzącą w jego skład.

Ogon pogłosowy reprezentuje odbicia wyższego rzędu bez konieczności liczenia dokładnych czasów tych odbić. Metoda ta ma swoje wady i zalety, jednak pozwala bardziej wiarygodnie zasymulować akustykę pomieszczenia, szczególnie dla długich czasów pogłosu związanych z użyciem w pomieszczeniu mocno odbijających materiałów lub dużą kubaturą obiektów. Dla takich przypadków liczenie odbić metodą śledzenia jest bardzo czasochłonne.

Na rysunku 3.14. znajdują się odpowiedzi impulsowe z dodanym ogonem pogłosowym dla dwóch różnych materiałów. Jak widać, zastosowanie płyty kartonowo-gipsowej wiąże się z długim czasem pogłosu, a uwzględnienie ogona znacznie bardziej wpływa na wrażenie przestrzenności niż w drugim przypadku, gdzie do wyłożenia ścian został użyty dywan.



Rys. 3.13. Odpowiedzi impulsowe pomieszczenia z uwzględnieniem odbić trzeciego rzędu i ogona pogłosowego dla różnych materiałów. U góry - dla płyty kartonowo-gipsowej, u dołu - gruby dywan.

3.6. Prezentacja odpowiedzi impulsowych

Gotowy symulator generuje odpowiedzi impulsowe pomieszczenia biorąc pod uwagę najważniejsze zjawiska zachodzące w czasie propagacji dźwięku. Wygenerowane odpowiedzi impulsowe mogą zostać użyte do dodawania ‘charakteru’ pomieszczenia i przestrzenności każdemu plikowi dźwiękowemu, najlepiej zarejestrowanego w komorze bezechowej, tak aby nagranie nie zawierało już odpowiedzi impulsowej innego pomieszczenia. Jedynym ograniczeniem jest tutaj częstotliwość próbkowania, która dla danego pliku dźwiękowego musi być taka sama jak zadana jako argument symulatora. Oczywiście możliwe jest wygenerowanie odpowiedzi impulsowych dla różnych częstotliwości próbkowania, ponieważ program dobiera wtedy odpowiednio współczynniki filtrów. Uzyskaną odpowiedź pomieszczenia można nałożyć na plik dźwiękowy dzięki operacji splotu.

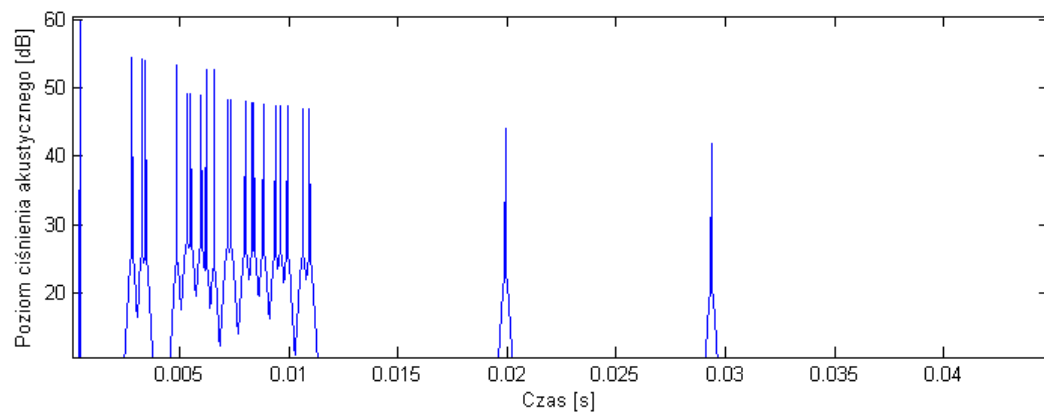
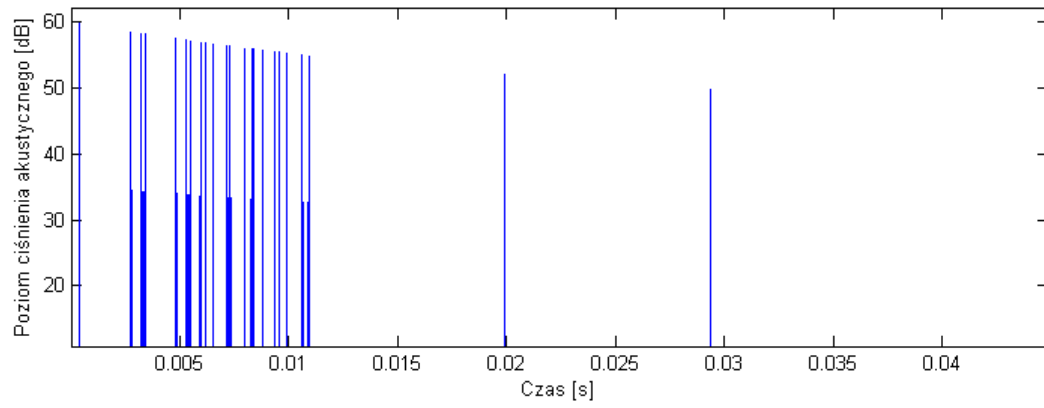
Program umożliwia również zmianę materiałów jakimi są pokryte ściany wirtualnego pomieszczenia.

Rysunki 3.14.-3.17. prezentują porównanie uzyskanych odpowiedzi impulsowych z echogramem wygenerowanym w CATT Acoustic.

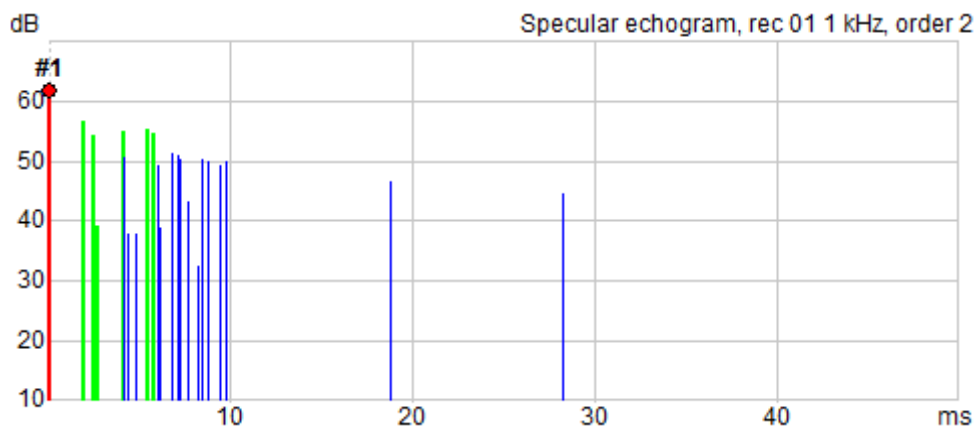
Z rysunków 3.14. i 3.16. widać, że w przypadku materiału mocno pochłaniającego, jakim jest dywan, widać mocno spadki poziomu dźwięku między odbiciami pierwszego i drugiego rzędu co wiąże się z pochłanianiem dużej ilości energii akustycznej przez ten materiał. Zależność ta jest natomiast niewidoczna dla płyty kartonowo-gipsowej, która jest materiałem słabo pochłaniającym, a spadek poziomu ciśnienia zależy głównie od odległości od źródła.

Jak widać echogramy wygenerowane przez symulator są podobne do tych z profesjonalnego oprogramowania, jakim jest CATT Acoustic.

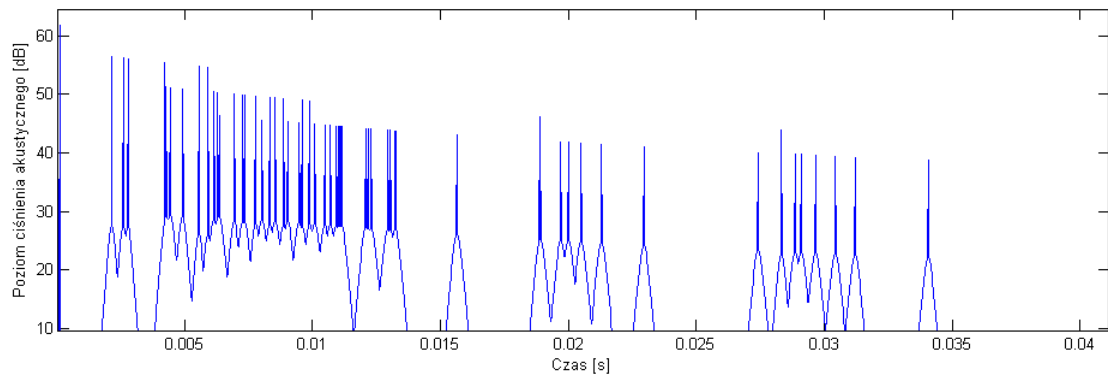
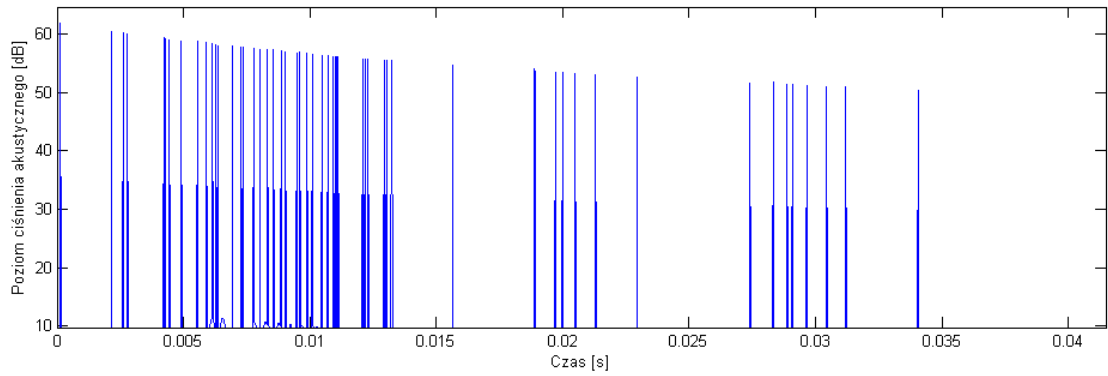
Pewnie różnice mogą wynikać z nieuwzględniania niektórych zjawisk, takich jak zależność pochłaniania od kąta padania fali, czy dyfrakcji.



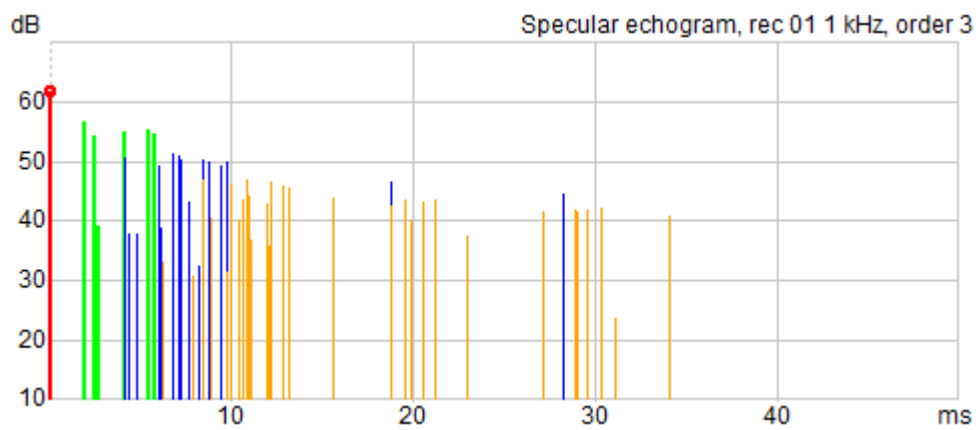
Rys. 3.14. Odpowiedzi impulsowe pomieszczenia uwzględniające odbicia pierwszego i drugiego rzędu dla różnych materiałów. U góry - płyta kartonowo-gipsowa, u dołu - gruby dywan.



Rys. 3.15. Echogram z CATT Acoustic uwzględniający odbicia pierwszego i drugiego rzędu.

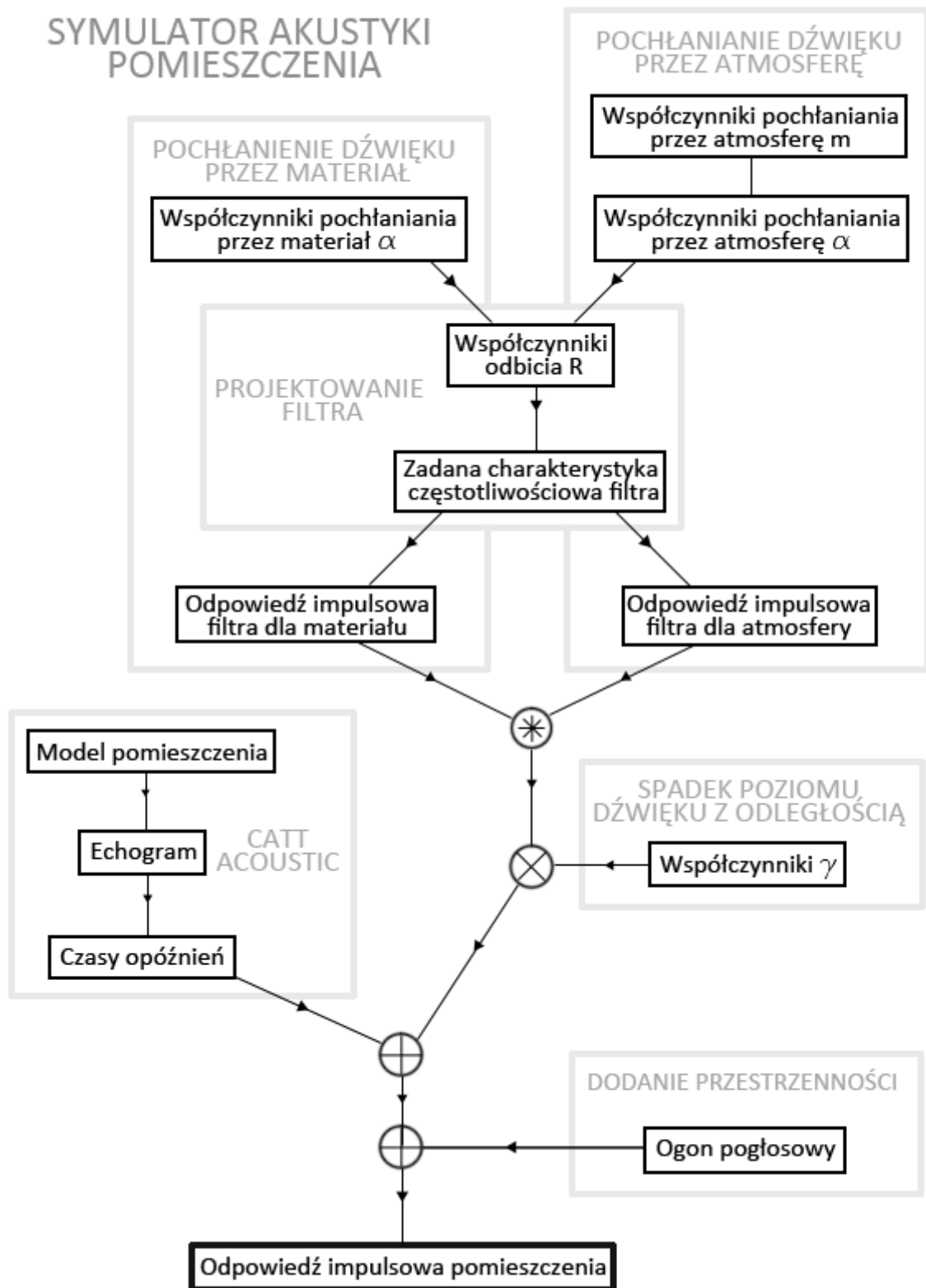


Rys. 3.16. Odpowiedzi impulsowe pomieszczenia w skali decybelowej z dodanymi odbiciami trzeciego rzędu dla dwóch materiałów. U góry – płyta kartonowo-gipsowa, u dołu - gruby dywan.



Rys. 3.17. Echogram zawierający odbicia do trzeciego rzędu wygenerowany przez CATT Acoustic.

3.7. Schemat blokowy działania programu



Rys. 3.14. Schemat blokowy działania programu

4. ZAKOŃCZENIE I WNIOSKI

4.1. Plany dalszego użycia programu

Prezentowany w niniejszej pracy program spełnia stawiane mu wymagania jako program do wstępnego testowania zjawisk akustycznych. Zaprezentowane tutaj odbicie jest tylko pierwszym z użyc programów w jego podstawowej formie.

Jako, że projekt, na potrzeby którego został stworzony symulator, wciąż rozwija się, z pewnością zaistnieje potrzeba ponownego użycia napisanego programu. Właściwie w trakcie pisania tej pracy, program był modyfikowany na potrzeby kolejnych zadań w ramach tworzenia silnika audio.

Kolejnymi zadaniami będą:

- Modelowanie zjawiska dyfrakcji,
- Modelowanie zjawiska przejścia dźwięku przez przeszkodę.

4.2. Podsumowanie

Prezentowane w tej pracy zadanie inżynierskie wymagało użycia większości wiedzy zdobytej w toku studiów na kierunku Inżynieria Akustyczna, a także zapoznanie się z nowymi metodami i literaturą. Do rozwiązania zadania niezbędne było dokładne wgłębienie się w fizykę rozchodzenia się dźwięku i analityczne jej przestudiowanie, ale też wykorzystanie wyczucia i intuicji zdobytych w czasie trzech lat studiów.

Kilka miesięcy wysiłku włożonego w rozwiązanie zadania inżynierskiego pozwoliło stworzyć funkcjonalny i użyteczny program, który wykorzystywany jest na potrzeby większego projektu. Ponadto udział w projekcie RAYAV daje pewne plany na przyszłość i umożliwia dalsze rozwiązywanie zadań podobnych tematycznie do tych zawartych w pracy inżynierskiej.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Makarewicz R.: *Dźwięki i fale*. Poznań, Wydawnictwo Naukowe UAM 2004
- [2] *Animations of Acoustic Waves*, strona internetowa Uniwersytetu Southampton
- [3] Vorländer M.: *Auralization*. Aachen, Springer 2008
- [4] Engineering Acoustics: Outdoor Sound Propagation. Wikibooks 2006.
- [5] Everest A.: *Master Handbook of Acoustics*. New York, McGraw-Hill 2001
- [6] Zieliński T.P.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów: od teorii do zastosowań*. Warszawa, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności 2005
- [7] Cox T. J., D'Antonio P.: *Acoustic Absorbers and Diffusers*. Abingdon, Oxon, Taylor & Francis 2009
- [8] Huopaniemi J., Savioja L., Karjalainen M.: "Modeling of Reflections and Air Absorption in Acoustical Spaces – A Digital Filter Design Approach" Mat. Konferencyjne *1997 IEEE ASSP Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, Nowy Jork, 18-22 Październik 1997
- [9] Cempel C.: *Wibroakustyka stosowana*. Warszawa, PWN 1989 (wydanie internetowe)
- [10] Raghuvanshi N., Lauterbach C., Chandak A., Manocha D., Lin M.C., Real-Time Sound Synthesis and Propagation for Games, *Communications of the ACM* 50, lipiec 2007, 67-73
- [11] Sztekmiller K.: *Podstawy nagłośnienia i realizacji nagrań*. Warszawa, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności 2011
- [12] Lyons R.G.: *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*. Warszawa, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności 2003
- [13] Kulowski A.: *Akustyka sal*. Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2007
- [14] Kuttruff H.: *Room Acoustics*. Londyn, Spon Press 2000
- [15] Kuttruff H.: *Acoustics: An Introduction*. Abingdon, Oxon, Taylor & Francis 2007
- [16] Havelock D., Kuwano S., Vorländer M.: *Handbook of Signal Processing in Acoustics*. Nowy Jork, Springer 2008
- [17] Hacura Ł., Borczyk W.: *Projektowanie i programowanie gier wideo*. Warszawa, Wydawnictwo PJWSTK 2011