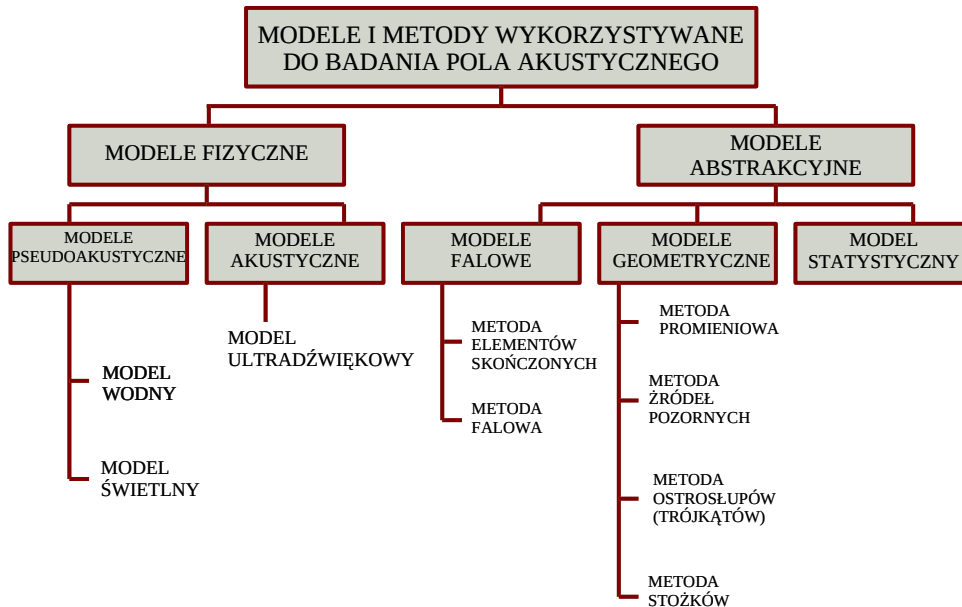


GEOMETRYCZNE MODELE POLA AKUSTYCZNEGO



MODELE POLA AKUSTYCZNEGO



MODELE ABSTRAKCYJNE

MODELE ABSTRAKCYJNE



abstrakcja matematyczna opisująca rzeczywistość, która określa relacje pomiędzy zmiennymi wejściowymi, wyjściowymi i zmiennymi stanu

stosunek wymiarów pomieszczenia do długości fal tworzących pole akustyczne



pomieszczenia o małej wielkości falowej

pomieszczenia o dużej wielkości falowej



MODELE ABSTRAKCYJNE

METODA STATYSTYCZNA

- ➔ powstał na bazie statystycznej teorii pola akustycznego;
- ➔ opiera się na wzorze na czas pogłosu pomieszczenia:

$$T = \frac{0.161V}{S * \alpha_{sr}}$$

gdzie:

- V – objętość pomieszczenia [m^3];
- S – pole powierzchni pomieszczenia [m^2];
- α_{sr} – średni pogłosowy współczynnik pochłaniania dźwięku



MODELE ABSTRAKCYJNE

MODELE FALOWE METODA STATYSTYCZNA

- ➔ częstotliwość Schroedera:

$$f_S = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (2)$$

gdzie:

- T – czas pogłosu obiektu [s];
- V – objętość pomieszczenia [m^3];

- ➔ stały poziom gęstości energii dźwiękowej w każdym punkcie pomieszczenia;
- ➔ jednakowe prawdopodobieństwo padania fali dźwiękowej we wszystkich kierunkach



MODELE ABSTRAKCYJNE

MODELE GEOMETRYCZNE



- ➔ wykreślna postać tej metody znana od starożytności;
- ➔ śledzenie biegu czoła fali kulistej rozchodzącej się w pomieszczeniu;
- ➔ zawodzi w przypadku fal o niskich i wysokich częstotliwościach;

Zastąpienie postępowania wykreślnego postępowaniem numerycznym umożliwiło:



- ➔ rozchodzenia się fal w przestrzeni trójwymiarowej;
- ➔ zasadnicze zwiększenie dokładności odtworzenia kierunku biegu fal;
- ➔ uwzględnianie znacznie większej liczby odbić;
- ➔ uwzględnienie zjawisk falowych zachodzących w pomieszczeniu



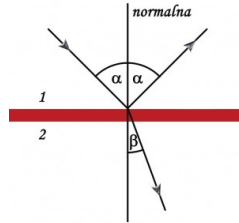
MODELE ABSTRAKCYJNE MODELE GEOMETRYCZNE

ZAŁOŻENIA WSTĘPNE:



Willebrord Snellius
(1580-1626)

- ➔ odbicie fal jest zgodne z prawem Snella;
- ➔ wymiary badanych pomieszczeń są wielokrotnie większe niż długość fal dźwiękowych rozprzestrzeniających się od danego źródła;
- ➔ droga czoła fali między kolejnymi odbiciami jest linią prostą;
- ➔ pomija się zjawiska falowe takie jak rozproszenie, ugięcie, nakładanie się fal



MODELE ABSTRAKCYJNE MODELE GEOMETRYCZNE

AKUSTYKA GEOMETRYCZNA



prawa propagacji dźwięku w przypadku granicznym
gdy długość fali λ zmierza do zera

optyka geometryczna ➔ zjawiska akustyczne

rozprzestrzenianie fal ➔ rozprzestrzenianie promieni
(pominięcie natury falowej)

promienie (fale dźwiękowe) ➔ linie, do których styczne
w każdym punkcie pokrywają się z kierunkiem
rozprzestrzeniania się fali



MODELE ABSTRAKCYJNE MODELE GEOMETRYCZNE



Pierre de Fermat
(1601-1665)

trajektorie promieni dźwiękowych biegnących od źródła dźwięku do odbiornika ➔ z zasady Fermata

„Promień świetlny poruszający się (w dowolnym ośrodku) od punktu A do punktu B przebywa zawsze lokalnie minimalną drogą optyczną, czyli taką, na której przebycie potrzeba czasu najkrótszego.”



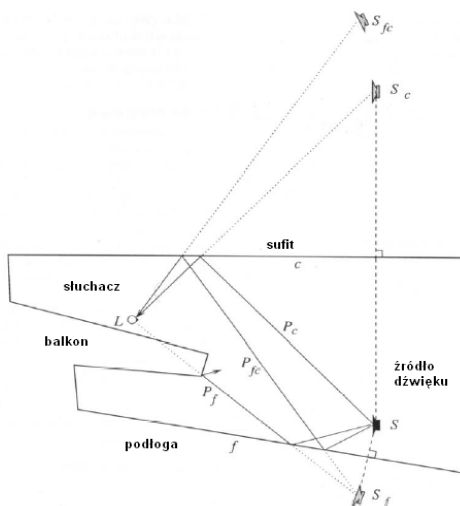
MODELE ABSTRAKCYJNE MODELE GEOMETRYCZNE

UPROSZCZENIA

- każdy promień dźwiękowy → części energii akustycznej jaką przenosi fala emitowana przez źródło dźwięku
- punkt obserwacji (zbieganie się promieni) → arytmetyczne sumowanie (pomija się wzajemne przesunięcia fazowe)



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH



METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

↓
zastąpienie źródła dźwięku i ścian pomieszczenia układem pozornych źródeł dźwięku, odpowiednio rozmieszczonych w analizowanym obszarze,

↓
śledzeniu drogi promienia dźwięku, łączącego te źródła z mikrofonem/odbiornikiem



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

ZAŁOŻENIA METODY

- fale dźwiękowe płynące z punktowego źródła dźwięku zastępuje się promieniami dźwiękowymi, które podlegają prawu zwierciadlanego odbicia od ścian;
- pomija się zależności fazowe przy propagacji i odbiciu, a także zjawisko ugięcia fali;
- jedynym efektem interferencji sygnałów akustycznych docierających do punktu obserwacji jest dodawanie się energii fal;
- wymiary pomieszczenia są duże w porównaniu z długością fali



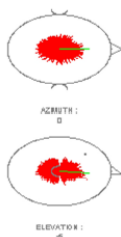
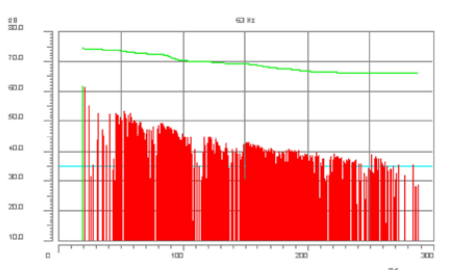
MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNYCH

ZASADY TWORZENIA OBRAZÓW POZORNYCH ŹRÓDEŁ DŹWIĘKU

- ➔ analogiczne do zasad znanych w optyce geometrycznej;
- ➔ bieg czoła fali jest śledzony wzdłuż kierunków propagacji, które umożliwiają dojście czoła fali od źródeł pozornych do punktu obserwacji z uwzględnieniem wszystkich znaczących odbić;
- ➔ każdej fali akustycznej dochodzącej do punktu obserwacji ze źródła rzeczywistego (po odbiciach), odpowiada oddzielne źródło pozorne;
- ➔ nie uwzględnia się zjawiska ugięcia fal na krawędziach powierzchni odbijających;
- ➔ nie uwzględnia się efektu brzegowego, występującego przy padaniu fal akustycznych na elementy dźwiękochłonne o ograniczonej powierzchni



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNYCH



WYNIK SYMULACJI
POLA
AKUSTYCZNEGO

↓
czasowe ciągi „porcji”
energii
docierających do
poszczególnych punktów

↕
ECHOGRAM



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNYCH

długości dróg przebytych
przez fale o określonej
częstotliwości



fazy fal w chwili
dotarcia do punktu
obserwacji



możliwość
uwzględnienia
interferencji
fal podczas obliczania
echogramu



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

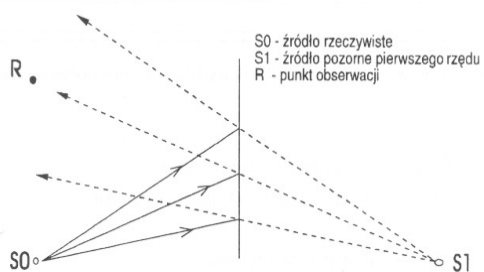
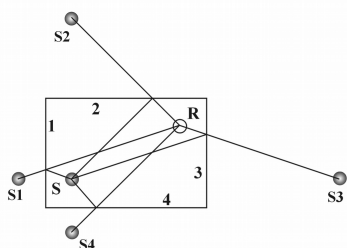
ALGORYTM POSTĘPOWANIA

- ➔ ponumerowanie ścian pomieszczenia oraz przypisanie im pogłosowych współczynników pochłaniania dźwięku;
- ➔ utworzenie ciągów liczbowych, będących kombinacjami numerów poszczególnych ścian;
- ➔ obliczenie współrzędnych źródeł pozornych, reprezentujących poszczególne sekwencje odbić;
- ➔ obliczenie echogramu



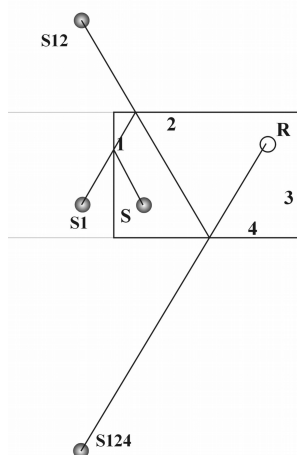
MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

IDEA KONSTRUKCJI ŹRÓDEŁ POZORNÝCH



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

IDEA KONSTRUKCJI ŹRÓDEŁ POZORNÝCH WYŻSZYCH RZĘDÓW



źródło pozorne trzeciego rzędu (odbicia) S_{124}



odbicie fali dźwiękowej od trzech ścian (ściany 1, ściany 2 i ściany 4)



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

ŹRÓDŁA POZORNE

źródła dźwięku o odpowiednio dobranej mocy, emitujące energię w polu swobodnym



ZAŁOŻENIE:
wszystkie ściany
jednorodne

moc źródła pozornego N rzędu jest βN razy mniejsza od mocy źródła rzeczywistego
charakterystyki kierunkowe źródeł pozornych są takie same jak źródła rzeczywistego



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

długości odpowiednich dróg
promieni rzeczywistych



długości odpowiednich dróg
promieni pozornych

rzędź źródła
pozornego



suma wartości bezwzględnych
wskaźników występujących
przy oznaczeniu źródła

współczynniki pochłaniania
na ścianach pomieszczenia



straty energii na drodze propagacji
promienia dźwiękowego,
zdeteminowanego przez odpowiednie
źródło pozorne



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

w rzeczywistości ściany nie są jednorodne



w ogólnym założeniu modelu przyjmuje się dla
źródeł pozornych moc
i charakterystykę identyczną jak dla źródła
rzeczywistego

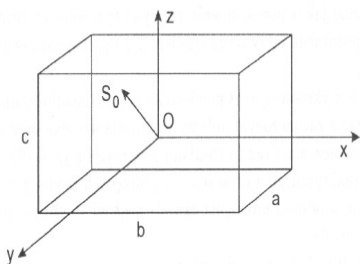


energję rzeczywistą dochodzącą od źródła pozornego do punktu obserwacji mnoży się przez współczynnik uwzględniający własności odbijające ściany w każdym z punktów odbić tego promienia



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

WYZNACZENIE ROZKŁADU PRZESTRZENNEGO ŹRÓDEŁ POZORNÝCH



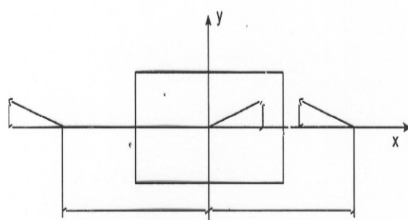
- ➔ początek układu współrzędnych przyjmuje się w geometrycznym środku pomieszczenia;
- ➔ wektorem wodzącym $\tau = (\tau_x, \tau_y, \tau_z)$ łączy się początek układu współrzędnych ze źródłem rzeczywistym S_0 ;

➔ obrazy pomieszczenia rzeczywistego uzyskuje się poprzez zwierciadlane jego odbicia względem wszystkich ścian (w każdym obrazie pomieszczenia jest zawsze tylko jedno źródło pozorne);

➔ wykreśla się rzut pomieszczenia prostopadłościennego na płaszczyznę xy (xz , yz) wraz z zaznaczonym położeniem źródła dźwięku oraz obrazy zwierciadlane pomieszczenia wraz ze źródłami pozornymi;



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH



- ➔ po wykonaniu zwierciadlanego odbicia od płaszczyzn prostopadłych do osi x (y, z), wprowadza się wektory łączące początek układu współrzędnych (środek pomieszczenia rzeczywistego) ze środkami pomieszczeń pozornych (punkty A i B) – długość tych wektorów wynosi a oraz wektory o współrzędnych $(-\tau_x, \tau_y, \tau_z)$ zaczepione w punktach A i B

➔ źródła pozorne pierwszego rzędu są więc określone przez wektory:

$$\begin{aligned} S_1 &= (a - \tau_x, \tau_y, \tau_z), & S_3 &= (\tau_x, b - \tau_y, \tau_z), & S_5 &= (\tau_x, \tau_y, c - \tau_z) \\ S_2 &= (-a - \tau_x, \tau_y, \tau_z), & S_4 &= (\tau_x, -b - \tau_y, \tau_z), & S_6 &= (\tau_x, \tau_y, -c - \tau_z) \end{aligned} \quad (3)$$



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

dla dowolnego źródła dźwięku:

$$S_{pqr} = (pa + (-1)^p \tau_x, qb + (-1)^q \tau_y, rc + (-1)^r \tau_z) \quad (4)$$

gdzie:

p, q, r należą do Z (zbiór liczb całkowitych)

$$N = |p| + |q| + |r| \quad (5)$$

gdzie:

N - całkowita liczba odbić danego promienia dźwiękowego od płaszczyzn ograniczających pomieszczenie (rzędź źródeł pozornych)



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

ilość źródeł pozornych w danym rzędzie $S(N)$:

$$S(N) = \sum_{r=N+1}^{N-1} 4(N - |r|) + 2 = 4N^2 + 2 \quad (6)$$

suma źródeł pozornych $K(N)$ do rzędu N :

$$K(N) = \sum_{K=1}^N 4K^2 + 2 = \frac{2}{3} N(2N^2 + 3N + 4) \quad (7)$$



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

ilość źródeł pozornych $S(N)$ danego rzędu N
i suma źródeł pozornych $K(N)$
do 10 rzędu włącznie

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S(N)	6	18	38	66	102	146	198	258	326	402
K(N)	6	24	62	128	230	376	574	832	1158	1560

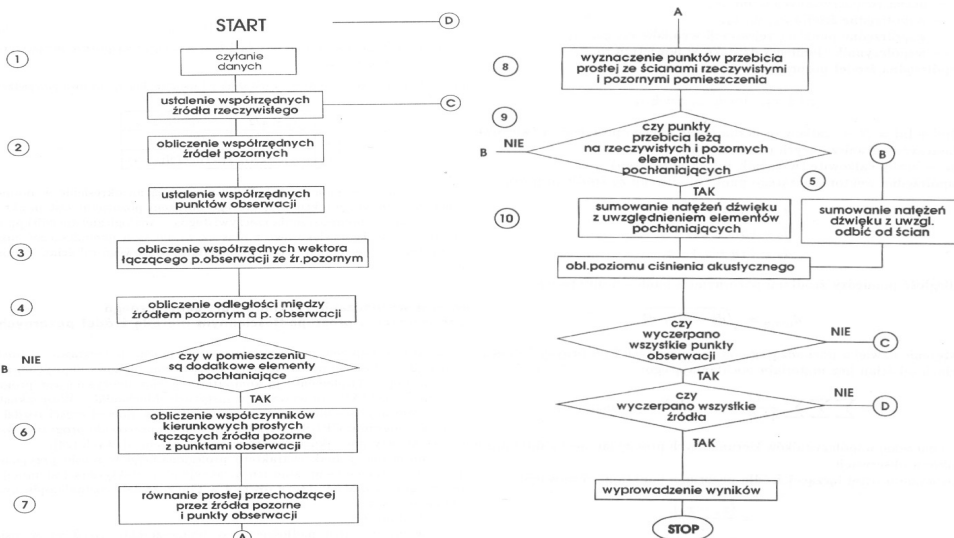


wraz ze wzrostem rzędu źródła wzrasta bardzo szybko liczba
źródeł pozornych



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

ALGORYTM WYZNACZANIA ROZKŁADU POLA AKUSTYCZNEGO
W POMIESZCZENIU PROSTOPADŁOŚCIENNYM





MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

1. DANE WEJŚCIOWE DO OBLICZEŃ (W PRZYPADKU POMIESZCZENIA PROSTOPADŁOŚCIENNEGO):

- ➔ wymiary pomieszczenia (α, β, γ) w osiach x, y, z ;
- ➔ współrzędne źródeł dźwięku $x_{S_i}, y_{S_i}, z_{S_i}$ oraz ich moc akustyczna Q_i , (i-ilość źródeł);
- ➔ współczynnik pochłaniania ścian (pogłosowy α');
- ➔ liczba elementów pochłaniających, ich rozmieszczenie oraz współczynniki pochłaniania α_i ;
- ➔ liczba rozpatrywanych odbić N ;
- ➔ współczynnik tłumienia dźwięku w powietrzu m_a



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

2. WYZNACZENIE WSPÓLRZĘDNYCH ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

$$\begin{cases} x_{IS} = \alpha \cdot l \pm x_S \\ y_{IS} = \beta \cdot m \pm y_S \\ z_{IS} = \gamma \cdot n \pm z_S \end{cases} \quad (8)$$

$$N = |l| + |m| + |n| \quad (9)$$

gdzie:

l, m, n - liczby całkowite (wskaźnik źródła pozornego)



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

3. WSPÓLRZĘDNE WEKTORA ŁĄCZĄCEGO PUNKT OBSERWACJI ZE ŹRÓDEŁAMI POZORNÝMI

$$\begin{cases} d_x = (\alpha \cdot l \pm x_S) - x_r \\ d_y = (\beta \cdot m \pm y_S) - y_r \\ d_z = (\gamma \cdot n \pm z_S) - z_r \end{cases} \quad (10)$$

4. ODLEGŁOŚĆ POMIĘDZY ŹRÓDEŁAMI POZORNÝMI A PUNKTEM OBSERWACJI

$$d_{l,m,n} = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} \quad (11)$$



5. NATĘŻENIE DŹWIĘKU POCHODZĄCEGO OD RZECZYWISTYCH I POZORNYCH ŹRÓDEŁ DŹWIĘKU PRZY ODBICIACH OD ŚCIAN BEZ MATERIAŁU POCHŁANIAJĄCEGO

$$I = \sum \sum \sum \frac{Q}{4 \cdot \Pi \cdot d_{lmn}^2} (1 - \alpha^1)^N \exp(-m_a d_{lmn}) \quad (12)$$



6. WYZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKÓW KIERUNKOWYCH PROSTEJ ŁĄCZĄCEJ ŹRÓDŁO POZORNE Z PUNKTEM OBSERWACJI

$$\begin{cases} \lambda = \frac{(x_s - x_r)}{d} \\ \mu = \frac{(y_s - y_r)}{d} \\ \gamma = \frac{(z_s - z_r)}{d} \end{cases} \quad (13)$$

7. RÓWNANIE PROSTEJ ŁĄCZĄCEJ ŹRÓDŁO POZORNE Z PUNKTEM OBSERWACJI

$$\frac{(x - x_r)}{\lambda} = \frac{(y - y_r)}{\mu} = \frac{(z - z_r)}{\gamma} \quad (14)$$



8. PUNKTY PRZEBICIA PROSTEJ (ŁĄCZĄCEJ ŹRÓDŁO POZORNE I PUNKTY OBSERWACJI) Z PŁASZCZYZNAMI POZORNYMI I RZECZYWISTYMI

$$\begin{cases} x = \alpha \cdot \left(l_i \pm \frac{1}{2} \right) \\ y = \frac{\mu}{\lambda} \cdot (x - x_r) + y_r \quad \text{dla } l_i \neq 0 \\ z = \frac{\gamma}{\lambda} \cdot (x - x_r) + z_r \end{cases} \quad (15)$$

gdzie:

całkowita liczba l_i ; $-l \leq l_i \leq l$



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

9. SPRAWDZENIE, KTÓRE PUNKTY PRZEBICIA LEŻĄ W RZECZYWISTYCH,
A KTÓRE W POZORNÝCH OBSZARACH
MATERIAŁÓW POCHŁANIAJĄCYCH

$$(m_i \cdot \beta - b_1) \leq y \leq (m_i \cdot \beta + b_2) \quad (16a)$$

$$(n_i \cdot \gamma - c_1) \leq z \leq (n_i \cdot \gamma + c_2) \quad (16b)$$

gdzie:

b_1, b_2, c_1, c_2 – proste ograniczające materiał pochłaniający

na płaszczyznę x: - $m \leq m_i \leq m$, - $n \leq n_i \leq n$



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

10. SUMARYCZNE NATĘŻENIE DŹWIĘKU W PRZYPADKU OBECNOŚCI
MATERIAŁÓW DŹWIĘKOCHŁONNYCH

$$I = \sum \sum \sum \frac{q}{4\pi d_{lmn}^2} \cdot (1 - \alpha')^{N - N_p} \cdot (1 - \alpha'')^{N_p'} \cdot (1 - \alpha''')^{N_p''} \dots \cdot \exp(-m_a d_{lmn}) \quad (17)$$

gdzie:

N_p'' - ilość odbić materiału o współczynniku pochłaniania α''

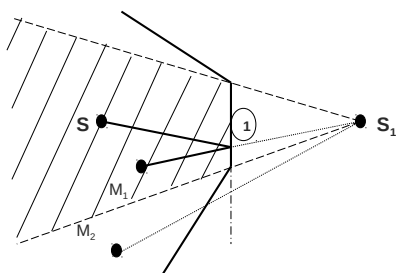
$$N_p = N_p'' + N_p''' + \dots$$



MODELE GEOMETRYCZNE METODA ŹRÓDEŁ POZORNÝCH

OGRANICZENIA

dla pomieszczeń o nieregularnych
kształtach



Fala odbita od ściany 1 dociera do odbiornika M_1 , podczas gdy odbiornik M_2 jest już dla niej „nieosiągalny”. Inaczej mówiąc, M_1 jest „widoczny” z S_1 , a M_2 nie jest. Z tego względu konieczne jest sprawdzanie wszystkich punktów przebiecia linii S_1M_j z odpowiednimi ścianami, tzn. sprawdzenie czy znajdują się w obrębie rzeczywistych granic pomieszczenia.

znaczne wydłużenie czasu oblicze numerycznych, zwłaszcza dla układów z dużą liczbą powierzchni ograniczających pomieszczenie



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

METODA PROMIENIOWA ↔ RAY METHOD



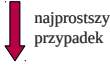
RAY TRACING TECHNIQUE



podział energii kulistej fali akustycznej
między tzw. cząstki dźwięku



korpusty dźwięku
(akustyczne)



cząstki wybiegają w kierunkach równomiernie rozłożonych
w pełnym kącie bryłowym wokół źródła



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

ZAŁOŻENIA METODY:

- ➔ fale dźwiękowe biegnące z punkowego źródła dźwięku zastępuje się promieniami dźwiękowymi, które podlegają prawu zwierciadlanego odbicia od ścian;
- ➔ jedynym efektem interferencji sygnałów akustycznych docierających do punktu obserwacji jest dodawanie się energii fal (nieuwzględnianie zależności fazowych);
- ➔ wymiary pomieszczenia duże w porównaniu z długością fali;
- ➔ odbiorniki są sferami



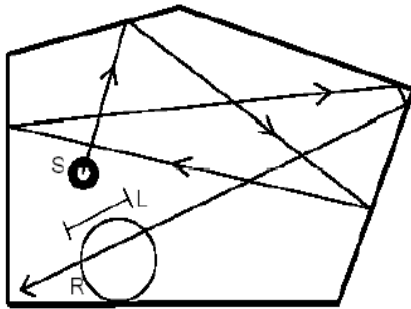
MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

OGRANICZENIA METODY:

- ➔ uwzględnienie tylko źródeł punktowych;
- ➔ uzależnienie długości modelowanej fali od wymiarów pomieszczenia;
- ➔ pominięcie zależności fazowych i zjawiska ugięcia fali



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA



OBSERWATOR
(ODBIORNIK)



nie punkt ale jego
otoczenie
(sfera o średnicy 1 m)



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

CZĄSTKI DŹWIĘKU



prawa rządzące propagacją
fal akustycznych

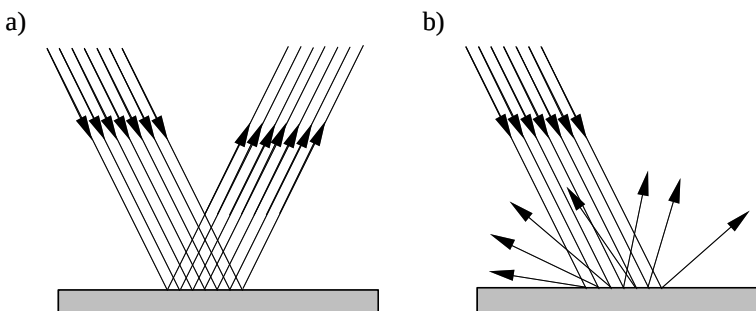
- cząstki biegną z prędkością dźwięku;
- ulegają odbiciom od ścian, tracąc energię proporcjonalnie do lokalnej wartości współczynnika pochłaniania dźwięku;
- uwzględnione jest pochłanianie energii przez ośrodek



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

Najistotniejsze elementy metody promieniowej:

- zastąpienie ciągłej struktury pola akustycznego strukturą ziarnistą;
- uniezależnienie torów korpuskuł od położenia obserwatora



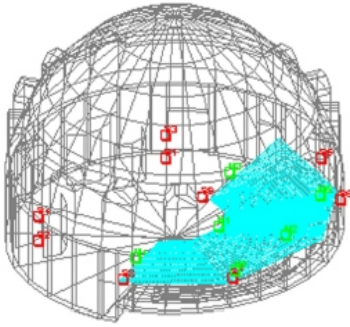
Przedstawienie lustrzanego (a) i rozproszonego (b) odbicia fali dźwiękowej przy użyciu metody promieniowej.

Strzałki wskazują kierunki biegu korpuskuł.



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

MODEL POMIESZCZENIA



przestrzeń wraz z ograniczającymi ją powierzchniami oraz obiektami znajdującymi się pomiędzy nimi, opisanymi także za pomocą powierzchni



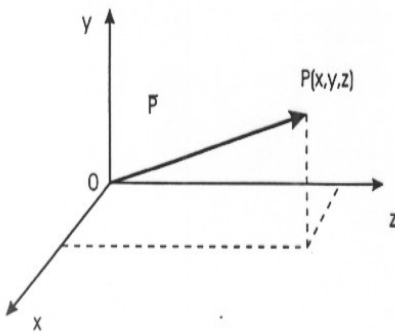
wypukłe wklęsłe

Parametrami akustycznymi opisującymi pomieszczenie są energetyczne współczynniki pochłaniania dźwięku przez powierzchnie i powietrze.



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

OPIS PUNKTU



PUNKT



wyznaczony przez wektor w lewoskrętnym układzie współrzędnych

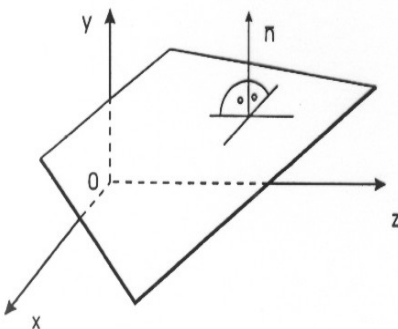


punkty pomieszczenia służą do wyznaczania obszarów



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

OPIS POWIERZCHNI



strona aktywna akustycznie



strona, której przypisano współczynnik pochłaniania

POWIERZCHNIA



obszar płaski wyznaczony przez 3 lub 4 punkty wierzchołkowe



wektor normalny do płaszczyzny powierzchni i odległość płaszczyzny od początku układu współrzędnych

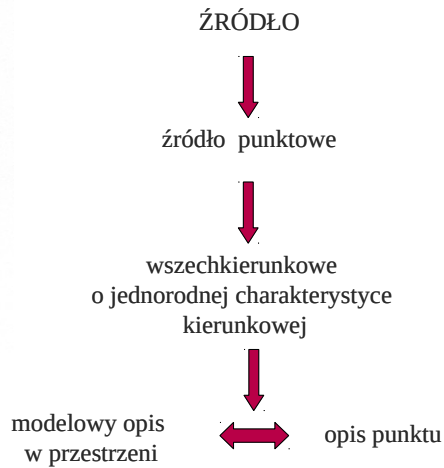
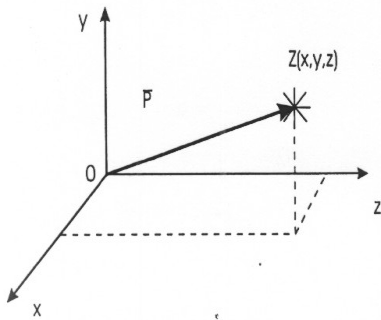


punkty wierzchołkowe obszaru są numerowane zgodnie z ruchem wskazówek zegara



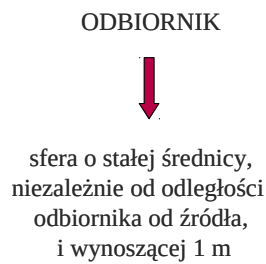
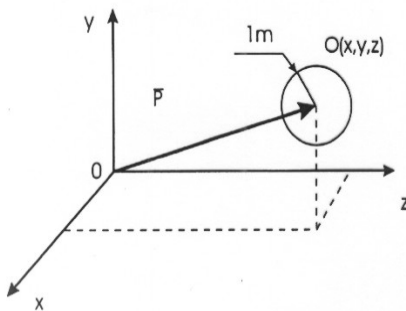
MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

MODEL ŹRÓDŁA



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

MODEL ODBIORNIKA

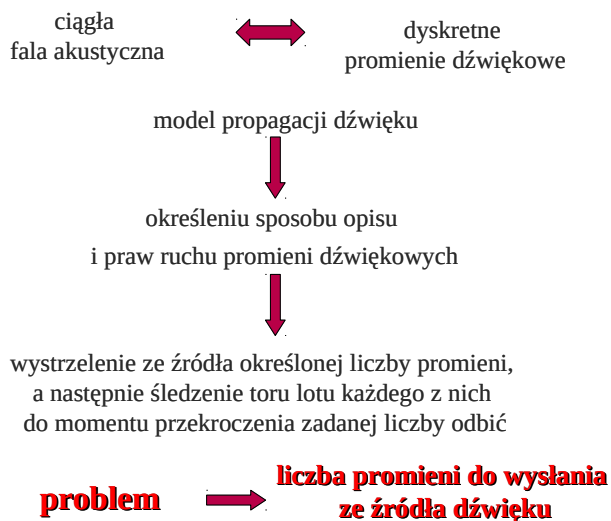


Wielkość średnicy może odpowiadać np. obszarowi, w którym przebywa człowiek, wykonujący niewielkie ruchy w przestrzeni.



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

MODEL PROPAGACJI DŹWIĘKU W POMIESZCZENIU





MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

SPOSÓB OBLICZENIA POZIOMU CIŚNIENIA AKUSTYCZNEGO

Natężenie dźwięku docierającego do odbiornika jedną trasą

$$I_i = \frac{Q}{4\pi d_i^2} \prod_{n=1}^k (1 - \alpha_n) \cdot \exp(-m_a d_i) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (18)$$

$$I_C = \frac{Q}{4 \cdot \Pi} \cdot \exp(-m_a) \cdot \exp(m_a) \cdot \sum_{i=1}^l \prod_{n=1}^k (1 - \alpha_n) \cdot \exp(-m_a \cdot d_i) \cdot d_i^{-2} \quad (19)$$

Metody i narzędzia programowe w akustyce

49



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

natężenie dźwięku w odległości 1m od źródła

$$I_1 = \frac{Q}{4 \cdot \Pi} \cdot \exp(-m_a) \quad (20)$$

współczynnikiem wzmocnienia dźwięku na trasach

$$W = \exp(m_a) \cdot \sum_{i=1}^l \prod_{n=1}^k (1 - \alpha_n) \cdot \exp(-m_a \cdot d_i) \cdot d_i^{-2} \quad (21)$$

z (19), (20) i (21)



$$I_C = I_1 \cdot W \quad (22)$$

Metody i narzędzia programowe w akustyce

50



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

poziom natężenia dźwięku w odległości 1m od źródła

$$L_1 = 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_0} \quad (23)$$

gdzie:

I_1 – natężenie dźwięku w odległości 1m od źródła;

I_0 – natężenie odniesienia



$$I_1 = I_0 \cdot 10^{0.1 L_1} \quad (24)$$

Ponieważ poziom natężenia dźwięku w powietrzu dla typowych warunków atmosferycznych jest porównywalny z poziomem ciśnienia akustycznego dźwięku, określenia te są stosowane wymiennie.

Metody i narzędzia programowe w akustyce

51



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

szukany poziom ciśnienia akustycznego dla odbiornika

$$L_C = 10 \cdot \log \frac{I_C}{I_0} \quad (25)$$

$$L_C = 10 \cdot \log(10^{0.1 L_1} \cdot W) \quad (26)$$

$$L_C = 10 \cdot \log 10^{0.1 L_1} + 10 \cdot \log W \quad (27)$$



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

$$L_C = L_1 \cdot \log 10 + 10 \cdot \log W \quad (28)$$

$$L_C = L_1 + 10 \log W \quad (29)$$

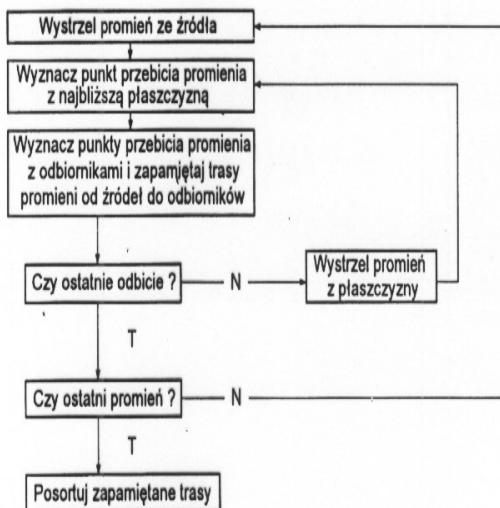
Poziom L_1 jest znany i podawany jako parametr opisujący źródło.

obliczenia sprowadzają tylko się do wyznaczenia współczynnika W



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

ALGORYTM METODY PROMIENIOWEJ



DANE WEJŚCIOWE:

- opis obiektów;
- opis źródeł dźwięku;
- opis odbiorników;
- liczba wystrzeżeń promienia dźwiękowego;
- maksymalna liczba odbić promienia od powierzchni ograniczających



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

DANE WYJŚCIOWE:

- ➔ trasy promieni;
- ➔ punkty trafień promienia w powierzchnię;
- ➔ poziomy ciśnienia akustycznego w punktach imisji

proces obliczeń
dwuetapowy



wyznaczenie tras
promieni dźwiękowych

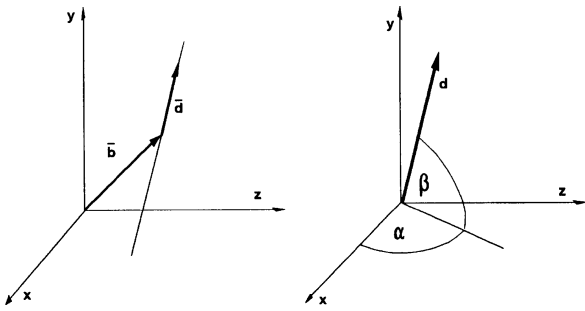


obliczenie poziomów
ciśnienia akustycznego
na podstawie
znalezionych tras



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

1. „WYŚLIJ” PROMIEŃ ZE ŹRÓDŁA



promień

półprosta o początku w
punkcie wystrzelenia
(źródło lub punkt przebicia
płaszczyzny)

Równanie półprostej zapisane jest przy pomocy
dwóch wektorów:

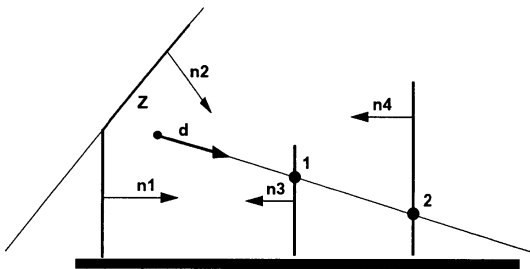
- ➔ wektora bazowego b (źródło lub punkt przebicia);
- ➔ wektora kierunkowego d .

$$\begin{cases} d_x = d \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\alpha) \\ d_y = d \cdot \sin(\beta) \\ d_z = d \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\alpha) \end{cases} \quad (30)$$



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

2. WYZNACZ PUNKT PRZEBICIA PROMIENIA Z NAJBLIŻSZĄ PŁASZCZYZNĄ



Z- źródło dźwięku,
 $n_1 \dots n_6$ - wektory normalne powierzchni,
1,2- punkty przebicia

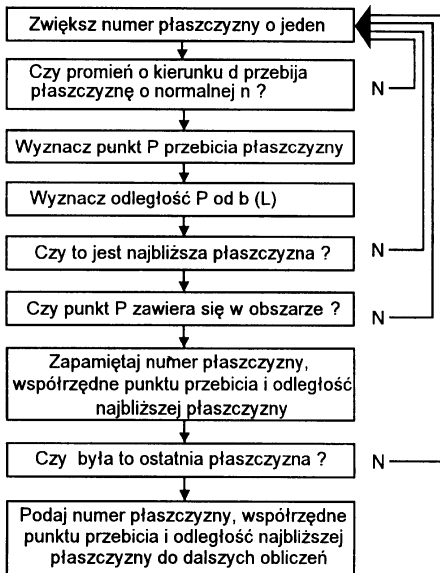
problem



znalezienie najbliższej
płaszczyzny na drodze
promienia



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA



Algorytm problemu
znalezienia najbliższej
płaszczyzny



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

2.1 CZY PROMIENIŃ O KIERUNKU d PRZEBIJA PŁASZCZYZNĘ O NORMALNEJ n ?

z założeń modelu geometrycznego płaszczyzny

promień dźwiękowy nie przebija płaszczyzn, których normalne tworzą z kierunkiem d kąt z przedziału $(0, 90^\circ)$

w celu wyeliminowania tych płaszczyzn sprawdzany jest iloczyn skalarny wektorów n i d

$$\bar{n} \cdot \bar{d} = |\bar{n}| \cdot |\bar{d}| \cdot \cos(\bar{n}, \bar{d}) < 0 \quad (31)$$



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

2.2 WYZNACZ PUNKT PRZEBICIA PŁASZCZYZNY

równanie opisującego płaszczyznę \oplus wyrażenia opisującego promień

$$\bar{n} \cdot (\bar{b} + \mu \cdot \bar{d}) = k \quad (32)$$

$$\bar{P}_{pp} = \bar{b} + \mu \cdot \bar{d} = \bar{b} + \frac{k - \bar{n} \cdot \bar{b}}{\bar{n} \cdot \bar{d}} \cdot \bar{d} \quad (33)$$

gdzie:

b – wektor bazowy promienia;

d – wektor kierunkowy promienia;

k – skalar opisujący przesunięcie płaszczyzny



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

2.3 WYZNACZ ODLEGŁOŚCI PUNKTU P_{pp} OD b



obliczenie
długości wektora o końcach w punktach P_{pp} i b



$$L_{pp} = \sqrt{(P_{ppx} - b_x)^2 + (P_{ppy} - b_y)^2 + (P_{ppz} - b_z)^2} \quad (34)$$



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

2.4 CZY TO JEST NAJBLIŻSZA PŁASZCZYZNA?

Odległość znaleziona w poprzednim punkcie jest porównywana z najmniejszą dotychczas znalezioną. Jeżeli jest od niej mniejsza, to uznaje się ją za najmniejszą.



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

2.5 CZY PUNKT P_{pp} ZAWIERA SIĘ W OBSZARZE?

dla każdego punktu wierzchołkowego obszaru wyznaczone są dwa wektory



wektor powstały z połączenia punktu z następnym punktem wierzchołkowym



wektor powstały z połączenia z punktem przebicia



iloczyn wektorowy

Jeżeli zwrot wektora powstałego w wyniku tego działania jest zgodny ze zwrotem wektora normalnego płaszczyzny, następuje wyliczenie wektorów dla następnego punktu wierzchołkowego.

Jeżeli zwrot wektora powstałego w wyniku tego działania nie jest zgodny ze zwrotem wektora normalnego płaszczyzny, oznacza to, że punkt przebicia leży poza obszarem.



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

2.6 CZY TO BYŁA OSTATNIA PŁASZCZYZNA?

Warunek sprawdza czy wszystkie płaszczyzny zostały przebadane.



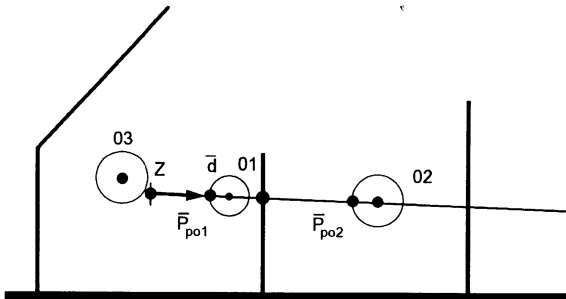
MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

3. WYZNACZ PUNKTY PRZEBICIA PROMIENIA Z ODBIORKAMI

Problem znalezienia punktu przebiecia odbiornika przez promień jest podobny jak znalezienie punktu przebiecia płaszczyzny.



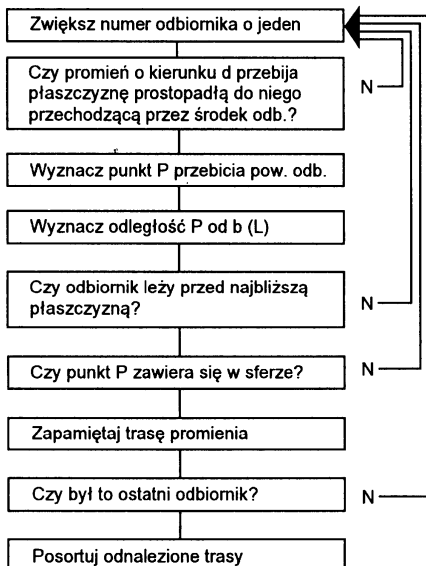
Należy wyeliminować wszystkie odbiorniki, które leżą dalej niż najbliższa płaszczyzna i nie leżą na kierunku promienia.



Z - źródło dźwięku,
 $O_1 \dots O_3$ - odbiorniki,
 P_{pp} - punkt przebiecia najbliższej płaszczyzny,
 P_{po1}, P_{po2} - punkty przebiecia odbiorników



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA



Algorytm pozwalający rozwiązać problem wyznaczania punktów przebiecia promienia dźwiękowego z odbiornikami



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

3.1 CZY PROMIEŃ O KIERUNKU d PRZEBIJA PŁASZCZYZNĘ PROSTOPADŁĄ DO NIEGO I PRZECHODZĄCĄ PRZEZ PUNKT BĘDĄCY ŚRODKIEM SFERY ODBIORNIKA?

Problem sprowadza się do wyznaczenia wektora n normalnego do powierzchni prostopadłej do promienia d , przechodzącej przez środek sfery odbiornika, a następnie zdecydowania o tym, czy promień przebija płaszczyznę o normalnej n .



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

3.2 WYZNACZ PUNKT P_{po} PRZEBICIA POWIERZCHNI ODBIORNIKA

równanie opisujące
płaszczyznę
przechodzącą przez
środek odbiornika



równanie promienia

$$\bar{d} \cdot (\bar{b} + \mu \cdot \bar{d}) = k \quad (35)$$

$$\bar{P}_{po} = \bar{b} + \mu \cdot \bar{d} = \bar{b} + \frac{k - \bar{d} \cdot \bar{b}}{\bar{d} \cdot \bar{d}} \cdot \bar{d} \quad (36)$$

gdzie:

b – wektor bazowy promienia;

d – wektor kierunkowy promienia;

k – skalar obrazujący przesunięcie płaszczyzny odbiornika



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

3.3 WYZNACZ ODLEGŁOŚĆ P_{po} OD b



obliczenie długości
wektora o końcach odpowiednio w punktach P_{po} i b

$$L_{po} = \sqrt{(P_{po_x} - b_x)^2 + (P_{po_y} - b_y)^2 + (P_{po_z} - b_z)^2} \quad (37)$$

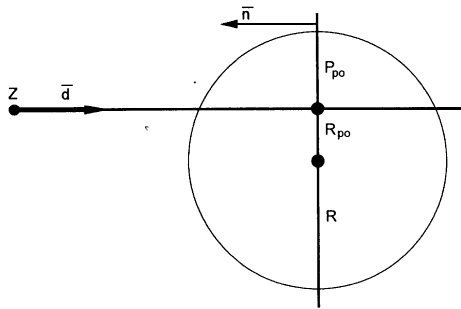
3.4 CZY ODBIORNIK LEŻY PRZED NAJBLIŻSZĄ POWIERZCHNIĄ?

odległość obliczona w poprzednim punkcie (L_{po}) jest porównywana z odległością najbliższej powierzchni (L_{ppmin})



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

3.5 CZY PUNKT P_{po} ZAWIERA SIĘ W SFERZE?



należy porównać R_{po} z zadany promieniem R



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

4. ZAPAMIĘTAJ TRASY PROMIENI

obliczenia wykonywane dwuetapowo

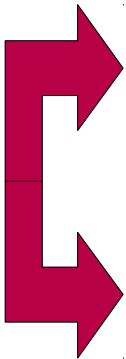


zapamiętanie wyznaczonych tras



wyznaczenie poziomu ciśnienia akustycznego

numery trafionych powierzchni oraz
współrzędne punktów przebicia



MODELE GEOMETRYCZNE METODA PROMIENIOWA

5. CZY OSTATNI PROMIEŃ?

zakończenie obliczeń geometrycznych następuje
po wysłaniu ostatniego promienia

6. POSORTUJ ZAPAMIĘTANE TRASY

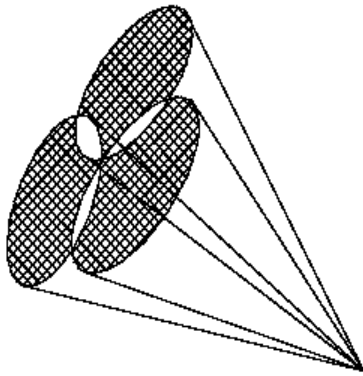
zapamiętane trasy należy posortować w ten sposób,
aby wyeliminowane zostały trasy powtarzające się

Po wykonaniu obliczeń geometrycznych wykonywane są
obliczenia poziomów ciśnienia akustycznego.



MODELE GEOMETRYCZNE METODY POCHODNE

METODA STOŻKÓW



źródło dźwięku
↓
stożki o przekroju kołowym
↓
badanie
drogi propagacji osi stożka

wewnątrz stożka znajduje się
punkt reprezentujący
odbiorcę

procedura
tworzenia
źródeł
pozornych

wyznaczenie
drogi promienia
od źródła do
odbiorcy



MODELE GEOMETRYCZNE METODY POCHODNE

Zastosowanie tej metody w przypadku modeli przestrzennych wymaga, aby stożki o kołowym przekroju poprzecznym zrekonstruowały oryginalne kuliste czoło fali. W celu uniknięcia luk między stożkami konieczne jest zastosowanie nakładania.

↓
sąsiednie stożki zachodzą na siebie

↓
odbiorca może być wykryty 2, 3 lub 4 razy

↓
redukcja niekorzystnych
skutków nakładania

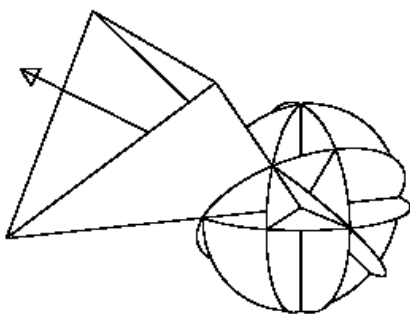
ustalenie toru promienia
docierającego
do punktu odbiorczego i
redukcję identycznych obrazów
źródła do jednego obrazu

zastosowanie funkcji
wagowej na przekroju
każdego stożka i
superpozycja ważonych
stożków



MODELE GEOMETRYCZNE METODY POCHODNE

METODA OSTROŚŁUPÓW



źródło
↓
ostrośłup
o przekroju trójkąta
równobocznego
↓
precyzyjny opis czoła
fali kulistej, bez
konieczności
stosowania nakładania

Wiązkę trójkątną definiuje się
przez centralną oś i trzy
płaszczyzny ograniczające.

wrażliwa
na odbicie
w narożu

W przypadku odbicia od
dwóch lub więcej powierzchni
kierunek propagacji wiązki jest
zdecydowany przez jej
oś centralną.



ADAPTACJA AKUSTYCZNA

Średni współczynnik pochłaniania dźwięku w zależności od rodzaju pomieszczenia

a_w	Rodzaj pomieszczenia
0,05	puste pomieszczenie z gładkimi ścianami z betonu lub cegły
0,1	częściowo puste pomieszczenie z gładkimi ścianami z betonu lub cegły
0,15	pomieszczenie z twardymi meblami, pomieszczenie maszyn, oddział fabryczny z instalacjami
0,2	pomieszczenie o złożonym kształcie wraz z instalacjami lub bez instalacji
0,25	pomieszczenia z meblami tapicerskimi, oddział fabryczny z częściowym pokryciem dźwiękochłonnym konstrukcji lub ustrojami dźwiękochłonnymi na ścianach i suficie
0,35	pomieszczenie z pełnymi pokryciami dźwiękochłonnymi na ścianach i suficie
0,5	pomieszczenie pokryte specjalnymi dźwiękochłonnymi ustrojami



ADAPTACJA AKUSTYCZNA

Chłonność akustyczną znajduje się również na podstawie pomiaru czasu pogłosu pomieszczenia, z wyrażenia:

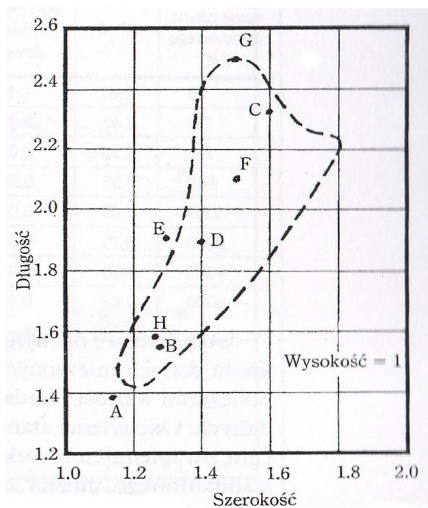
$$A = 0,161 \frac{V}{T}$$

gdzie

- V – objętość pomieszczenia [m³];
- T – czas pogłosu [s].



ADAPTACJA AKUSTYCZNA

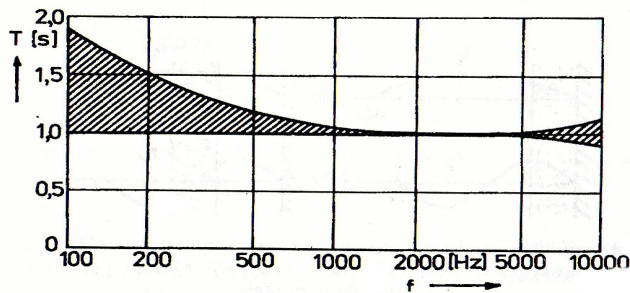


Wykres korzystnych proporcji wymiarów pomieszczenia dla uzyskania jednorodnego rozkładu częstotliwości drgań własnych pomieszczenia



PROJEKT ADAPTACJI AKUSTYCZNEJ POMIESZCZENIA

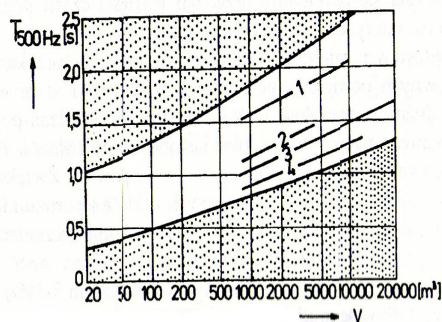
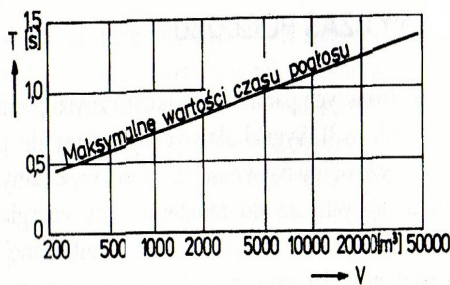
Dla każdego pomieszczenia, w zależności od rodzaju mowy i muzyki, jak też w zależności od jego objętości, określa się optymalny przedział wartości czasu pogłosu i jego optymalną charakterystykę w funkcji częstotliwości.



Dopuszczalne zmiany wartości optymalnego czasu pogłosu pomieszczeń przeznaczonych do odtwarzania muzyki



PROJEKT ADAPTACJI AKUSTYCZNEJ POMIESZCZENIA



Maksymalne wartości czasu pogłosu pomieszczeń o różnych objętościach, przeznaczonych do odtwarzania sygnałów mowy i muzyki (1 – obiekty sakralne = muzyka organowa; 2 – sala koncertowa; 3 – studio muzyki operowej; 4 – teatry muzyczne, kina)



PROJEKT ADAPTACJI AKUSTYCZNEJ POMIESZCZENIA

W przypadku sal teatralnych i koncertowych niezbędne jest szczegółowe rozważenie zarówno czynników muzycznych i akustycznych, jak też ich współzależności.

Czynniki akustyczne	Czynniki muzyczne
Czas pogłosu Stosunek głośności dźwięku bezpośredniego do odbitego Tempo muzyki	Pełnia brzmienia (fullness of tone) Wyrazistość, jasność (clarity), definicja (definition)
Krótki czas opóźnienia pierwszego odbicia (initial time delay gap) (18-wieczne sale muzyczne) Średni czas opóźnienia pierwszego odbicia (19-wieczne sale koncertowe) Bardzo długi czas opóźnienia pierwszego odbicia (katedry)	Intymność (intimacy)
Bogactwo basów Bogactwo trebli Zakłócenia dźwiękowe (tonal distortion) Obraz przestrzenny dźwięku (texture) Równowaga dźwięku (balance) Wymieszanie dźwięku (blend) Rozproszenie dźwięku w sali (diffusion in hall) Bezwłoczność odzewu (attack)	Barwa dźwięku (timbre and tone colour)
Wzajemna zdolność słyszenia się wykonawców	Zespołowość (ensemble)
Głośność fortissimo Stosunek poziomu zakłóceń tła do głośności dźwięku pianissimo	Zakres dynamiczności (dynamic range)



Rozległą pracę badawczą na temat zależności czynników muzycznych i akustycznych od siebie oraz ich wpływu na subiektywne odczuwanie walorów akustycznych sal wykonał L. L. Beranek. Podzielił on sale wg pięciu kategorii jakości:

- A+ - doskonałe - 90 do 100 punktów
- A - b. dobre do doskonałych - 80 do 90 punktów
- B+ - dobre do b. dobrych - 70 do 80 punktów
- B - dostateczne do dobrych - 60 do 70 punktów
- C+ - dostateczne - 50 do 60 punktów.

Salę, które wg Beranka uzyskują mniej niż 50 punktów nie nadają się na sale operowe i koncertowe.



KRYTERIA JAKOŚCI SAL

Czas pogłosu

W najprostszym przypadku czas pogłosu pomieszczenia można wyznaczyć z wzoru Sabine'a i zależy on tylko od gabarytów pomieszczenia i zastosowanych materiałów pochłaniających

$$T = \frac{0,161V}{S * \alpha_{sr} + 4 * m_a * V}$$

gdzie:

- V - objętość pomieszczenia,
- S - całkowita powierzchnia pochłaniająca,
- α_{sr} - średni współczynnik pochłaniania,
- m_a - współczynnik pochłaniania dźwięku przez powietrze.



KRYTERIA JAKOŚCI SAL

Poziom ciśnienia akustycznego (Sound Pressure Level)

ciśnienie akustyczne odniesione do ciśnienia akustycznego odpowiadającego dolnej granicy percepcji słuchowej ($p_0=2*10^{-5}$ Pa):

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0}$$



C80

współczynnik klarowności dla muzyki [dB] odpowiada subiektywnemu parametrowi przejrzystości, określającemu możliwość rozróżnienia poszczególnych dźwięków i ich źródeł:

$$C_{80} = 10 \left(\log \frac{E_{80}}{E_{\infty} - E_{80}} \right)$$



Lateral Efficiency LEF współczynnik odbić bocznych

opisuje stosunek energii odbić bocznych do energii docierającej ze wszystkich kierunków

$$L E F = \frac{E_{80 B i} - E_{25 B i}}{E_{80}}$$

gdzie:

E_{Bi} - energia odbita od ścian bocznych, docierająca odpowiednio do 25 ms i do 80 ms,

E - całkowita energia docierająca do odbiornika do 80 ms.



C50 współczynnik klarowności dla mowy [dB]

parametr bliźniaczy dla C80, opisującym zrozumiałość mowy a także śpiewu

$$C_{50} = 10 \left(\log \frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}} \right)$$



Definition D wyrazistość [%]

jest współczynnikiem podobnym do C50, jest stosunkiem energii docierającej do 50 ms od wyłączenia źródła dźwięku, do energii docierającej do odbiornika po 50 ms

$$D = \frac{E_{50}}{E_{\infty}}$$



STI Speech Transmission Index

parametr opisujący zrozumiałość mowy. Opiera się na modulowanej funkcji przejścia (MTF) i mieści się w przedziale (0,1).

STI	Zrozumiałość mowy
0,00 - 0,30	zła
0,30 - 0,45	uboga
0,45 - 0,60	dostateczna
0,60 - 0,75	dobra
0,75 - 1,00	doskonała



Articulation Loss of Consonants AICons

określa zrozumiałość mowy na podstawie liczby poprawnie zrozumianych spółgłosek w testach składających się z odpowiednich wyrazów monosylabicznych

$$AICons = 0,652 \left(\frac{E_{\infty} - E_{35}}{E_{35}} \right) * RT$$