

INSTYTUT TELEKOMUNIKACJI I AKUSTYKI
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Dział A

Akustyka

Ocena wrażenia kierunku położenia
pozornego źródła dźwięku wytwarzanego
przez sygnały losowe przesyłane za
pomocą dwukanałowego głośnikowego
systemu stereofonii natężeniowej

Ryszard Makowski

Praca doktorska

Promotor: doc.dr hab.inż. Stanisław Miszczak

Słowa kluczowe: stereofonia głośnikowa
obiektywna ocena lokalizacji
model toru
sygnał losowy

mgr inż. Ryszard Makowski

Instytut Telekomunikacji i Akustyki
Politechniki Wrocławskiej
50-370 Wrocław
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27
tel. 206-221

Raport wpłynął do redakcji 26 marca 1982 roku

Panu Doc.Dr.Hab.Inż. Stanisławowi Miszczakowi
szczerze podziękowania za cenne rady i wska-
zówki w trakcie wykonywania niniejszej
pracy składa

autor

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń użytych w pracy	6
Rozdział 1	
WSTĘP	10
Rozdział 2	
OKREŚLENIE SYGNAŁÓW DOCIERAJĄCYCH DO USZU SŁUCHACZA PRZY ODBIORZE BEZPOŚREDNIM	18
2.1. Opis sygnałów	18
2.2. Opis przejścia sygnałów od źródła dźwięku do uszu słuchacza w warunkach bezpogłosowych	19
2.3. Określenie odpowiedzi impulsowych h_{SL} i h_{SP}	21
2.4. Wyznaczenie odpowiedzi impulsowych h_{SL} i h_{SP}	24
2.5. Opis przejścia sygnału od źródła dźwięku do uszu słuchacza w warunkach pogłosowych	26
Rozdział 3	
OKREŚLENIE SYGNAŁÓW DOCIERAJĄCYCH DO USZU SŁUCHACZA ZA POŚREDNICTWEM DWUKANAŁOWEGO GŁOŚNIKOWEGO SYSTEMU STEREO- FONII NATĘŻENIOWEJ	30
3.1. Wprowadzenie	30
3.2. Opis przekształceń sygnałów po stronie nadawczej ..	31
3.2.1. Analiza w warunkach bezpogłosowych	31
3.2.2. Analiza w warunkach pogłosowych	32
3.3. Opis przekształceń sygnałów po stronie odbiorczej..	33
3.3.1. Określenie ciśnienia akustycznego wytwa- rzanego przez głośniki w dowolnym punkcie pola swobodnego	33
3.3.2. Przekształcanie przez zewnętrzny system słuchowy sygnałów emitowanych przez głoś- niki	34
3.4. Opis toru dwukanałowej głośnikowej stereofonii natężeniowej	36

3.5. Opis teoretycznego systemu dwukanałowej głośnikowej stereofonii natężeniowej	38
Rozdział 4	
OKREŚLENIE I WYZNACZENIE NIEKTÓRYCH PARAMETRÓW SYGNAŁÓW Z UWZGLĘDNIENIEM WŁAŚCIWOŚCI ORGANU SŁUCHU CZŁOWIEKA	42
4.1. Pamięciowość organu słuchu	42
4.2. Definicja chwilowej funkcji autokorelacji	43
4.3. Lokalizacja na podstawie czoła fali	44
4.4. Określenie sygnału emitowanego przez źródło dźwięku	45
4.5. Wprowadzenie czasu dyskretnego	46
4.6. Wyniki obliczeń	47
Rozdział 5	
OKREŚLENIE I WYZNACZENIE PARAMETRÓW LOKALIZACYJNYCH	52
5.1. Eksperymentalne określenie parametrów lokalizacyjnych	52
5.2. Matematyczne określenie parametrów lokalizacyjnych	52
5.3. Parametry lokalizacyjne dla odbioru bezpośredniego	54
5.3.1. Analiza wyników obliczeń dla warunków bezpogłosowych	54
5.3.2. Analiza wyników obliczeń dla warunków pogłosowych	56
5.4. Analiza wyników obliczeń parametrów lokalizacyjnych dla odbioru za pośrednictwem dwukanałowej głośnikowej stereofonii natężeniowej	59
Rozdział 6	
KRYTERIUM OCENY WRAŻENIA KIERUNKU POŁOŻENIA ŹRÓDŁA DŹWIĘKU	68
6.1. Wprowadzenie	68
6.2. Model decyzyjny	69
6.3. Uśredniony model decyzyjny	71
6.4. Definicja odległości d_k i kąta α_k	74
6.5. Interpretacja odległości d_k i kąta α_k	80
6.6. Procedura obiektywnej oceny wrażenia kierunku położenia źródła dźwięku	84

Rozdział 7

OBIEKTYWNA OCENA DWUKANAŁOWEGO GŁOŚNIKOWEGO SYSTEMU

STEREOFONII NATĘŻENIOWEJ	88
7.1. Analiza współzależności kątów α_k	88
7.2. Naturalność wytwarzanego wrażenia kierunku	91
7.3. Porównanie otrzymanych wyników z wynikami badań psychofizjologicznych	94

Rozdział 8

ZAKOŃCZENIE	97
-------------------	----

Dodatek A

CZYNNIKI KSZTAŁTUJĄCE PARAMETRY SYGNAŁÓW DOCIERAJĄCYCH DO BŁON BĘBENKOWYCH USZU SŁUCHACZA	103
--	-----

Dodatek B

OBLICZANIE ODPOWIEDZI IMPULSOWYCH ZEWNĘTRZNEGO SYSTEMU SŁUCHOWEGO NA PODSTAWIE MODUŁÓW FUNKCJI PRZEJŚCIA	106
---	-----

Dodatek C

SCHEMATY BLOKOWE I OPISY PROGRAMÓW	113
Bibliografia	122

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ UŻYTYCH W PRACY

- a - promień kuli modelującej bryłę głowy słuchacza
- $A_{M\bullet}(\varphi)$ - charakterystyka kierunkowości lewego lub prawego mikrofonu
- $B(\tau, t_0)$ - chwilowa funkcja autokorelacji
- c - prędkość rozchodzenia się dźwięku
- $C_S(f, t_0)$ - międzyuszne opóźnienie czasowe
- d_k - odległość od zbioru $\mathcal{H}_k$
- $E\{\bullet\}$ - operator uśredniania po zbiorze realizacji
- f - częstotliwość
- $FT\{\bullet\}$ - proste przekształcenie Fouriera
- $FT^{-1}\{\bullet\}$ - odwrotne przekształcenie Fouriera
- $h(t_1, t_2)$ - dwuwymiarowa odpowiedź impulsowa
- $h_{G\bullet}(t)$ - minimalnofazowa odpowiedź impulsowa opisująca zamianę sygnału podawanego na lewy lub prawy głośnik w sygnał w punkcie przestrzeni swobodnej
- $h_{M\bullet}(t)$ - minimalnofazowa odpowiedź impulsowa opisująca zamianę sygnału emitowanego przez źródło dźwięku w sygnał na wyjściu lewego lub prawego mikrofonu
- ${}^1h_{N\bullet}(t)$ - odpowiedź impulsowa opisująca przejście sygnału od źródła dźwięku do lewego lub prawego ucha słuchacza za pośrednictwem teoretycznego toru dwukanałowej głośnikowej stereofonii natężeniowej
- ${}^2h_{N\bullet}(t)$ - odpowiedź impulsowa opisująca przejście sygnału od źródła dźwięku do lewego lub prawego ucha słuchacza za pośrednictwem toru stereofonicznego przy

braku odbić od ścian pomieszczenia odbiorczego

$h_{S_{\bullet}}(t)$ - minimalnofazowa odpowiedź impulsowa opisująca przejście sygnału od źródła dźwięku do lewego lub prawego ucha słuchacza dla odbioru bezpośredniego w warunkach bezpogłosowych

$^1h_{S_{\bullet}}(t)$ - odpowiedź impulsowa opisująca przejście sygnału od źródła dźwięku do lewego lub prawego ucha słuchacza dla odbioru bezpośredniego w warunkach bezpogłosowych

$^2h_{S_{\bullet}}(t)$ - odpowiedź impulsowa opisująca przejście sygnału od źródła dźwięku do lewego lub prawego ucha słuchacza dla odbioru bezpośredniego w warunkach występowania odbić od ścian

$H(f)$ - funkcja przejścia odpowiadająca odpowiedzi impulsowej $h(t)$

$\mathcal{H}$ - zbiór będący opisem modelu decyzyjnego lokalizacji źródła dźwięku

$\mathcal{H}_k$ - przekrój zbioru $\mathcal{H}$ dla $f = f_k$

j - jednostka

$k(t)$ - odpowiedź impulsowa opisująca odbicie od ściany

$L_{S_{\bullet}}(f, t_0)$ - poziom chwilowego widma mocy sygnału w pobliżu błony bębenkowej lewego lub prawego ucha słuchacza

$\Delta L_S(f, t_0)$ - międzyuszna różnica poziomów chwilowych widm mocy

O - oś symetrii

r - odległość źródła dźwięku od słuchacza

$r_{\bullet}$ - odległość lewego lub prawego głośnika od słuchacza

r_M - odległość źródła dźwięku od mikrofonu

r_r - droga przebyta przez r -ty promień fali

$R_{LL}(t_1, t_2)$ - dwuwymiarowa funkcja autokorelacji sygnału docierającego do lewego ucha słuchacza

$R_{PP}(t_1, t_2)$ - dwuwymiarowa funkcja autokorelacji sygnału docierającego do prawego ucha słuchacza

$R_{xx}(t_1, t_2)$ - dwuwymiarowa funkcja autokorelacji sygnału emitowanego przez źródło dźwięku

$S(f, t_0)$ - chwilowe widmo mocy

t - czas

$T(f)$ - moduł funkcji przejścia $H(f)$

T_{SO} - długość stałej czasowej słuchu

$W_k(t)$ - okno czasowe

$x(t)$ - sygnał emitowany przez źródło dźwięku

$y_*(t)$ - sygnał na wyjściu lewego lub prawego mikrofonu

$v_*(t)$ - sygnał w pobliżu błony bębenkowej lewego lub prawego ucha słuchacza

α_k - kąt w płaszczyźnie horyzontalnej położenia pozornego źródła dźwięku względem słuchacza określony na podstawie zaproponowanego w rozprawie kryterium

(α, β) - kąt położenia źródła dźwięku względem słuchacza

(α_r, β_r) - kąt padania r -tego promienia fali odbitej na słuchacza

(α_*, β_*) - kąt położenia lewego lub prawego głośnika względem słuchacza

$\delta(t)$ - dystrybucja Diraca

${}^2\delta(t_1, t_2)$ - dystrybucja Diraca w przestrzeni dwuwymiarowej

(ζ_*, ξ_*) - kąt położenia słuchacza względem lewego lub prawego głośnika

$\mathcal{H}$ - kąt w płaszczyźnie horyzontalnej, połowa kąta rozstawienia głośników

τ - opóźnienie czasowe dla układu minimalnofazowego

- τ^w - opóźnienie czasowe dla układu wszechprzepustowego
- τ^* - sumaryczne opóźnienie czasowe
- τ_M^* - opóźnienie czasowe opisujące czas przejścia sygnału od źródła dźwięku do mikrofonu
- τ_{SB}^* - opóźnienie czasowe opisujące czas przejścia sygnału od głośnika do bliższego ucha słuchacza dla systemu teoretycznego
- τ_{SK}^* - opóźnienie czasowe opisujące czas przejścia sygnału od głośnika do dalszego ucha słuchacza dla systemu teoretycznego
- $\tau_{S\bullet}^*$ - opóźnienie czasowe opisujące czas przejścia sygnału od źródła dźwięku do lewego lub prawego ucha słuchacza
- (φ, θ) - kąt położenia źródła dźwięku względem mikrofonu
- $\Theta(f)$ - argument funkcji przejścia lub przesunięcie fazowe
- $*$ - operacja splotu

INDEKSY

- nr - liczba odbić od ścian r-tego promienia fali
- r - parametry r-tego promienia fali odbitej
- B - wyniki uzyskane dla odbioru bezpośredniego w warunkach bezpogłosowych
- G $\bullet$ - lewy lub prawy głośnik
- k - dla częstotliwości $f = f_k$
- L - lewy
- M $\bullet$ - lewy lub prawy mikrofon
- N - system stereofonii natężeniowej
- P - prawy
- S $\bullet$ - lewe lub prawe ucho słuchacza
- $\bullet$ - lewy lub prawy

Rozdział 1

WSTĘP

Jedną z właściwości organu słuchu człowieka jest zdolność lokalizacji źródła dźwięku. Określenie kierunku położenia źródła dźwięku możliwe jest dzięki binauralności słuchu. Rozstawienie dwóch odbiorników dźwięku w różnych punktach przestrzeni powoduje, że sygnały docierające do błon bębenkowych uszu słuchacza różnią się między sobą. Różnice te spowodowane są dodatkowo zakłócającym działaniem bryły głowy. Fakt, że kierunek położenia źródła dźwięku może być również określony przez osobę posiadającą uszkodzone jedno ucho [9, 23, 36] wskazuje na istnienie jeszcze innych czynników umożliwiających lokalizację.

Od bardzo wielu lat prowadzone są badania nad słyszeniem przestrzennym. W badaniach tych można wyodrębnić dwa zasadnicze nurty. Jeden z nich oparty jest na badaniach psychofizjologicznych, czyli na subiektywnych ocenach dokonywanych przez słuchaczy. W wyniku tych badań ustalono między innymi jakie parametry sygnałów docierających do uszu słuchacza mają wpływ na lokalizację źródła dźwięku [7, 12, 19, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 31, 32, 34, 48, 52, 58, 60, 61, 62].

Drugi nurt, to badania oparte na obiektywnych pomiarach sygnałów docierających do uszu słuchacza [1, 4, 5, 6, 13, 14, 17, 33, 54, 55, 56, 57, 64, 67]. Badania te prowadzone były przede wszystkim w warunkach bezpogłosowych i doprowadziły do określenia, w jaki sposób zewnętrzny system słuchowy wpływa na pewne pa-

rametry sygnałów docierających do lewego i prawego ucha.

W niniejszej pracy podjęto próbę obiektywnej oceny efektu stereofonicznego. Do opracowania metody oceny wykorzystano zarówno wyniki badań subiektywnych jak i wyniki obiektywnych pomiarów charakterystyk zewnętrznego systemu słuchowego człowieka.

Słyszenie przestrzenne jest właściwością organu słuchu składającą się z wielu elementów. Furdujev [21] wyróżnia trzy składowe słyszenia przestrzenne:

- lokalizację źródeł dźwięku,
- rozdzielczość sygnałów,
- atmosferę akustyczną.

Dokładne przekazanie wszystkich składowych słyszenia przestrzennego za pomocą dwukanałowego głośnikowego systemu stereofonicznego nie jest możliwe.

Do wywołania dobrego efektu stereofonicznego nie jest konieczne wierne przekazanie pierwotnego przestrzennego obrazu dźwiękowego. Nie jest na przykład konieczne, aby rozmieszczenie pozornych źródeł dźwięku było takie samo jak w pomieszczeniu nadawczym. Konieczne jest natomiast, aby wytwarzane przez sygnały przekazywane torem stereofonicznym pozorne źródła dźwięku, można było umieścić w dowolnym punkcie bazy oraz aby wrażenie kierunku było wrażeniem naturalnym.

W niniejszej pracy, ocenę wtórnego obrazu dźwiękowego ograniczono do oceny podstawowej składowej efektu stereofonicznego jaką jest lokalizacja źródła dźwięku. Należy jednak zaznaczyć, że dobrej lokalizacji towarzyszyć będzie dobra rozdzielczość sygnałów.

Proponowana metoda oceny efektu lokalizacji oparta jest na znajomości parametrów sygnałów docierających do uszu słuchacza. Sygnały te można wyznaczyć znając sygnał emitowany przez źródło

dźwięku oraz dysponując modelem matematycznym toru jakim przekazywany jest ten sygnał do uszu słuchacza. Model taki pozwala również na badanie wpływu różnych elementów toru na efekt lokalizacyjny. W literaturze brak jest wystarczająco precyzyjnych modeli tego typu. Istniejące modele /Bernfeld, Smith [5], Blauert [7], Leackey [29], Żyszkowski [68]/ zostały zbudowane przy zbyt daleko idących uproszczeniach. Nie uwzględniają na przykład, że efekt zacieniający bryły głowy i opóźnienia między sygnałami docierającymi do lewego i prawego ucha, zależą od częstotliwości, bądź pomijają zależności fazowe występujące między sygnałami. Poza tym, wszystkie znane z literatury modele torów stereofonicznych i sygnałów w nich transmitowanych nie uwzględniają niestacjonarności tych sygnałów. Z badań psychofizjologicznych wynika natomiast, że niestacjonarności sygnałów mają istotny wpływ na wrażenie lokalizacyjne.

Sygnał foniczny podczas przejścia od źródła dźwięku do uszu słuchacza poddawany jest różnego rodzaju przekształceniom. Przekształcenia te są wynikiem zachodzenia zjawisk fizycznych takich jak opóźnienia czasowe, dyfrakcje, interferencje, odbicia i rezonanse. Mimo, że zjawiska te mają przestrzenny charakter, sygnały docierające do błon bębenkowych uszu słuchacza można /w zakresie do ok. 12 kHz/ traktować jako sygnały jednowymiarowe /Shaw [57], Winckel [65]/. Dokładniej problem ten omawiany jest w Dodatku A.

Dotychczasowe badania psychofizjologiczne [9, 17, 24, 25, 26, 29, 31, 56] doprowadziły do określenia na podstawie jakich parametrów sygnałów docierających do uszu słuchacza, słuchacz ocenia kierunek położenia źródła dźwięku. W literaturze brak jest jednak precyzyjnych, z punktu widzenia teorii sygnałów, matematycznych definicji tych parametrów. W podawanych definicjach /Blauert [7], Feddersen, Sandel, Teas, Jeffress [17], Furdujev

[21], Hanning [25, 26], Leackey [29], Searle, Braida, Davis, Colburn [53]/ ignorowany jest bądź fakt złożoności struktury widmowej sygnałów fonicznych, bądź związany z niestacjonarnością sygnałów efekt czoła fali.

Nie zostało również dotychczas zbudowane kryterium pozwalające na ocenę wrażenia kierunku położenia źródła dźwięku. Na potrzeby istnienia takiego kryterium zwraca uwagę Blauert [7] podając nawet pewne ogólne zasady konstruowania takiego kryterium. Z powodu braku kryterium systemy stereofoniczne oceniane są za pomocą badań psychofizjologicznych. Jedną z cech badań psychofizjologicznych jest ich duża pracochłonność. Poza tym, ponieważ nie ma zadawalających modeli torów stereofonicznych, czyli nie zawsze wiadomo czy i w jaki sposób dany czynnik wpływa na wrażenie lokalizacyjne powstające u słuchacza, wyniki badań uzyskiwane przez różnych badaczy są niekiedy rozbieżne, a niejednokrotnie ich porównanie między sobą nie jest możliwe. Konsekwencją tego stanu rzeczy są sprzeczne oceny systemów stereofonicznych. Znamienny jest również fakt, że dotychczas nie zdołano opracować systemu stereofonicznego dającego zadawalające wrażenie lokalizacyjne. Jedną z przyczyn tego stanu jest niewątpliwie brak kryterium pozwalającego ocenę.

Niniejsza praca przyczynić ma się do wypełnienia przedstawionych wyżej luk. Stanowi próbę całościowego spojrzenia na problem słyszenia przestrzennego i problem oceny systemów stereofonicznych. Ze względu na powszechność tego sposobu przekazywania dźwięku i związaną z tym dyssatysfakcję wielu słuchaczy z powodu niezadawalającej jakości wrażenia lokalizacyjnego wytwarzanego za pomocą systemów stereofonicznych, problem oceny tych systemów jest szczególnie ważny dla producentów aparatury stereofonicznej.

Podstawowe tezy pracy:

1. Możliwe jest zbudowanie funkcjonalnych modeli matematycznych opisujących przekształcenia niestacjonarnego procesu losowego podczas przejścia od źródła dźwięku do uszu słuchacza dla odbioru bezpośredniego i za pośrednictwem systemu stereofonicznego w różnych warunkach akustycznych,
2. W ramach korelacyjnej teorii sygnałów, w oparciu o chwilowe charakterystyki procesu niestacjonarnego, możliwe jest zdefiniowanie tych parametrów sygnałów, którymi posługuje się słuchacz przy ocenie kierunku położenia źródła dźwięku. Parametry te nazywane będą parametrami lokalizacyjnymi,
3. Na podstawie parametrów lokalizacyjnych sygnałów docierających do błon bębenkowych uszu słuchacza, możliwe jest zbudowanie kryterium pozwalającego na obiektywną ocenę wrażenia lokalizacyjnego wytwarzanego przez te sygnały,
4. Rozwiązanie trzech pierwszych zagadnień umożliwia obiektywną ocenę wrażenia lokalizacyjnego wytwarzanego przez sygnały przekazywane dwukanałowym głośnikowym systemem stereofonii natężeniowej.

W pracy zajęto się dwoma przypadkami odbioru przez słuchacza sygnału emitowanego przez źródło dźwięku:

- odbiorem bezpośrednim,
- odbiorem za pośrednictwem dwukanałowego głośnikowego systemu stereofonii natężeniowej.

Rozważenie przypadku odbioru bezpośredniego pozwoliło na określenie związków występujących między położeniem źródła dźwięku emitującego sygnał a parametrami lokalizacyjnymi sygnałów docierających do uszu słuchacza. W warunkach odbioru bezpośredniego, wyłączając przypadki występowania silnych zakłóceń odbiciowych, słuchacz nie ma trudności z oceną kierunku położenia źródła

dźwięku. Lokalizacja w takich warunkach jest naturalna. Odbiór bezpośredni może stanowić więc punkt odniesienia przy ocenie innych sposobów odbioru.

Rozważenie przypadku odbioru za pośrednictwem systemu stereofonicznego pozwoliło na określenie sygnałów docierających do uszu słuchacza a tym samym na określenie ich parametrów lokalizacyjnych. Mając obliczone parametry lokalizacyjne oraz dysponując kryterium umożliwiającym obiektywną ocenę efektu lokalizacyjnego, można dokonać oceny systemu stereofonicznego bez potrzeby wykonywania badań psychofizjologicznych.

Zaproponowane modele matematyczne stanowią opis przejścia sygnału od źródła dźwięku do błon bębenkowych uszu słuchacza. Kanał uszny zakończony błoną bębenkową stanowi ostatnie ogniwo zewnętrznego systemu słuchowego człowieka. Sąsiedztwo błony bębenkowej jest ostatnim punktem toru, gdzie możliwy jest jeszcze pomiar parametrów docierających tam sygnałów. Z tego powodu w literaturze [1, 4, 13, 54, 55, 56, 57] podawane są najczęściej charakterystyki zewnętrznego systemu słuchowego opisujące tor akustyczny kończący się w bliskim sąsiedztwie błony bębenkowej.

Spośród wielu możliwych systemów stereofonicznych, w niniejszej pracy analizie poddano wyłącznie dwukanałowy głośnikowy system stereofonii natężeniowej. Jest to najbardziej rozpowszechniony w radiofonii europejskiej, w tym także w polskiej, system stereofoniczny. Z tego powodu analiza zjawisk zachodzących w takim torze jest szczególnie ważna. Rozpatrywany system stereofoniczny ograniczono do pomieszczenia nadawczego ze źródłem dźwięku i mikrofonem koincydencyjnym oraz pomieszczenia odbiorczego z układem głośników i słuchaczem. Zrezygnowano więc z analizy kształtowania sygnałów w urządzeniach reżyserii. Przekształcenia jakim poddawany jest sygnał stereofoniczny w reżyserii zależne są bowiem od

wrażeń estetycznych reżysera dźwięku i cechuje je duża zmienność w czasie. Z podanych powodów przekształcenia te trudne są do matematycznego opisu. Zrezygnowano również z analizy przesyłania sygnałów drogą radiową. Z założenia bowiem radiowy tor przesyłowy nie powinien wprowadzać zniekształceń do sygnałów.

W celu uczynienia modeli bardziej funkcjonalnymi przyjęto, że sygnał foniczny przechodząc od źródła dźwięku do uszu słuchacza, poddawany jest wyłącznie przekształceniom liniowym.

Podstawowe rozważania zawarte są w rozdziałach od 2 do 7.

W rozdziale 2 wprowadzono opis sygnałów za pomocą dwuwymiarowych funkcji autokorelacji. Poza tym w rozdziale tym budowane są modele matematyczne opisujące przejście sygnału od źródła do uszu słuchacza przy odbiorze bezpośrednim w warunkach bezpogłosowych i pogłosowych. O źródle dźwięku założono, że jest źródłem punktowym. Do opisu zewnętrznego systemu słuchowego człowieka wykorzystano moduły funkcji przejścia z pola swobodnego do uszu słuchacza podane przez Shawa [56]. Na podstawie modułów funkcji przejścia, korzystając z transformaty Hilberta, określono odpowiedzi impulsowe opisujące zewnętrzny system słuchowy.

Rozdział 3 poświęcony jest opisowi odbioru za pośrednictwem dwukanałowego głośnikowego systemu stereofonii natężeniowej. Przy budowaniu modeli wykorzystano wyniki uzyskane w rozdz. 2. W końcowej części rozdz. 3 wprowadzono założenia sprowadzające rozważany system do przypadku teoretycznego. Rozważania zawarte w rozdz. 2 i 3 udawadniają pierwszą z tez pracy.

Rozdział 4 zawiera krótki opis tych właściwości organu słuchu, które mają wpływ na lokalizację źródeł dźwięku, definicję chwilowej funkcji autokorelacji określonej na podstawie dwuwymiarowej funkcji autokorelacji oraz wyniki obliczeń chwilowych funkcji autokorelacji sygnałów dochodzących do uszu słuchacza.

W celu umożliwienia wykonania obliczeń, wprowadzono czas dyskretny oraz przyjęto założenia co do sygnału emitowanego przez źródło dźwięku. Obliczenia wykonano korzystając z modeli przedstawionych w rozdz. 2 i 3.

W rozdziale 5 zdefiniowano parametry sygnałów docierających do uszu słuchacza mające decydujący wpływ na ocenę kierunku położenia źródła dźwięku. Definicje te oparte są na chwilowych widmach mocy określonych, na mocy uogólnionego twierdzenia Wienera-Chinczyna, na podstawie chwilowych funkcji autokorelacji. Na podstawie wyników uzyskanych w rozdz. 4 określono zależności parametrów lokalizacyjnych od częstotliwości, kąta horyzontalnego położenia źródła dźwięku względem słuchacza i innych czynników dla odbioru bezpośredniego w warunkach bezpogłosowych i pogłosowych. Określono również zależności parametrów lokalizacyjnych od częstotliwości, kąta horyzontalnego położenia źródła dźwięku względem mikrofonu i innych czynników dla odbioru za pośrednictwem systemu stereofonicznego w warunkach bezpogłosowych. Rozważania zawarte w rozdz. 4 i 5 udawadniają drugą tezę pracy.

Rozdział 6 zawiera opis kryterium umożliwiającego estymację subiektywnego wrażenia kierunku położenia źródła dźwięku oraz jakości wrażenia lokalizacyjnego na podstawie częstotliwości i parametrów lokalizacyjnych. Kryterium oparte jest na znajomości współzależności parametrów lokalizacyjnych, częstotliwości i kierunku położenia źródła dźwięku w warunkach odbioru bezpośredniego przy braku odbić od ścian pomieszczenia. Rozważania te udawadniają trzecią tezę pracy.

W rozdziale 7, w oparciu o określone w rozdz. 5 parametry lokalizacyjne oraz o wprowadzone w rozdz. 6 kryterium, dokonano oceny dwukanałowego głośnikowego systemu stereofonii natężeniowej.

Rozdział 2

OKREŚLENIE SYGNAŁÓW DOCIERAJĄCYCH DO USZU SŁUCHACZA PRZY ODBIORZE BEZPOŚREDNIM

2.1. Opis sygnałów

Sygnały emitowane przez źródła dźwięku, a tym samym sygnały transmitowane we wszelkiego rodzaju torach stereofonicznych, są sygnałami losowymi. Obiektywna ocena efektu lokalizacji źródeł dźwięku wymaga uwzględnienia wielu właściwości organu słuchu człowieka /patrz rozdz. 4, 5, 6/. Ponieważ system słuchowy człowieka jest skomplikowanym odbiornikiem percypującym zarówno widmo sygnału jak i relacje czasowe w nim występujące, opis sygnałów musi oddawać złożoność sygnału fonicznego. Z tego powodu konieczne jest traktowanie sygnału fonicznego jako procesu niestacjonarnego.

Rzeczywisty niestacjonarny proces stochastyczny drugiego rzędu $s(t)$ można opisać za pomocą dwuwymiarowej funkcji autokorelacji $R_{ss}(t_1, t_2)$ zdefiniowanej jako /Levin [30], Papoulis [42]/:

$$R_{ss}(t_1, t_2) = E\{s_f(t_1)s_f(t_2)\} \quad /2.1/$$

gdzie: $E\{s_f\}$ - operator uśredniania po zbiorze realizacji,

$s_f(t)$ - realizacja procesu losowego.

Funkcję autokorelacji procesu $z(t)$ będącego odpowiedzią układu liniowego niezmiennego w czasie o odpowiedzi impulsowej $h(t)$ na proces losowy $s(t)$, można wyznaczyć z zależności [30, 42]:

$$R_{zz}(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_{ss}(t_1 - \eta_1, t_2 - \eta_2) h(\eta_1) h(\eta_2) d\eta_1 d\eta_2 =$$

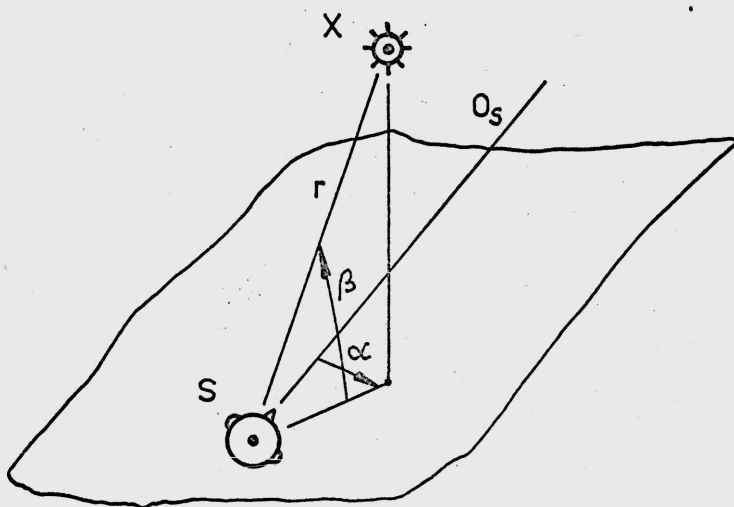
$$= R_{ss}(t_1, t_2) * h(t_1) * h(t_2)$$

/2.2/

gdzie: $*$ - operacja splotu, $R_{zz}(t_1, t_2)$ - dwuwymiarowa funkcja autokorelacji procesu wyjściowego, $R_{ss}(t_1, t_2)$ - dwuwymiarowa funkcja autokorelacji procesu wejściowego, $h(t)$ - odpowiedź impulsowa układu.

2.2. Opis przejścia sygnałów od źródła dźwięku do uszu słuchacza w warunkach bezpogłosowych

Jeśli początek sferycznego układu współrzędnych znajduje się w punkcie S określającym środek bryły głowy słuchacza, oraz oś symetrii tego układu pokrywa się z osią symetrii O_s słuchacza, to położenie punktowego źródła dźwięku X względem słuchacza można opisać za pomocą współrzędnych (r, α, β) . Sytuację taką przedstawiono na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Położenie źródła dźwięku X względem słuchacza S .

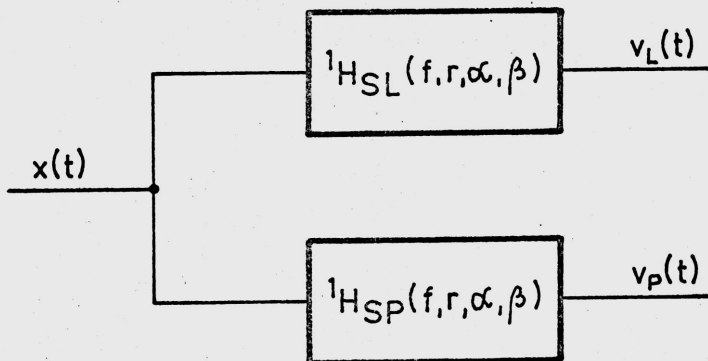
Dla fali kulistej ciśnienie dźwięku w polu swobodnym w odległości r od źródła dane jest zależnością [35, 68]:

$$x_r(t) = \frac{1}{r} x(t - \tau)$$

/2.3/

gdzie: $x_1(t)$ - ciśnienie dźwięku w odległości r , $x(t)$ - ciśnienie dźwięku w odległości jednostkowej, r - odległość od źródła dźwięku, τ - opóźnienie czasowe, $\tau = (r-1)/c$,
 c - prędkość rozchodzenia się dźwięku.

Zależność /2.3/ jest słuszna, gdy rozchodzenie się fali dźwiękowej nie jest zakłócanie. W przypadku odbioru przez słuchacza sygnału emitowanego przez źródło dźwięku, sygnały docierające do błon bębenkowych uszu słuchacza dodatkowo kształtowane są przez przeszkodę akustyczną, jaką jest bryła głowy. Przekształcanie sygnału emitowanego przez źródło dźwięku - $x(t)$, w sygnały docierające do uszu słuchacza - $v_L(t)$ i $v_P(t)$, może reprezentować model przedstawiony na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Model układu źródło dźwięku - słuchacz

Człony opisane funkcjami $1H_{SL}$ i $1H_{SP}$ reprezentują malenie amplitudy oraz opóźnienie czasowe spowodowane rozchodzeniem się fali akustycznej oraz zmiany widma sygnału i dodatkowe opóźnienia czasowe spowodowane zakłócającym działaniem bryły głowy. Funkcje $1H_{SL}$ i $1H_{SP}$ są funkcjami położenia źródła dźwięku względem słuchacza (r, α, β) oraz częstotliwości f .

Model przedstawiony na rys. 2.2 można opisać za pomocą zależności:

$$\begin{aligned} u_L(t) &= x(t) * {}^1h_{SL}(t, r, \alpha, \beta) \\ u_P(t) &= x(t) * {}^1h_{SP}(t, r, \alpha, \beta) \end{aligned} \quad \left| \quad /2.4/ \right.$$

gdzie: ${}^1h_{SL}, {}^1h_{SP}$ - odpowiedzi impulsowe kanału akustycznego od źródła dźwięku do lewego i prawego ucha słuchacza.

Uwzględniając, że sygnał $x(t)$ jest procesem losowym opisanym za pomocą dwuwymiarowej funkcji autokorelacji $R_{xx}(t_1, t_2)$, zależności /2.4/ można zapisać w postaci:

$$\begin{aligned} R_{LL}(t_1, t_2) &= R_{xx}(t_1, t_2) * {}^1h_{SL}(t_1, r, \alpha, \beta) * {}^1h_{SL}(t_2, r, \alpha, \beta) \\ R_{PP}(t_1, t_2) &= R_{xx}(t_1, t_2) * {}^1h_{SP}(t_1, r, \alpha, \beta) * {}^1h_{SP}(t_2, r, \alpha, \beta) \end{aligned} \quad \left| \quad /2.5/ \right.$$

2.3. Określenie odpowiedzi impulsowych ${}^1h_{SL}$ i ${}^1h_{SP}$

Odpowiedzi impulsowe ${}^1h_{SL}$ i ${}^1h_{SP}$ dane są odwrotnymi przekształceniami Fouriera z funkcji przejścia ${}^1H_{SL}$ i ${}^1H_{SP}$:

$${}^1h_{S\bullet}(t, r, \alpha, \beta) = FT^{-1}\{ {}^1H_{S\bullet}(f, r, \alpha, \beta) \} \quad /2.6/$$

Indeks $\bullet$ oznacza indeks L lub indeks P.

Funkcje przejścia ${}^1H_{S\bullet}$ są funkcjami zespolonymi, a więc:

$${}^1H_{S\bullet}(f, r, \alpha, \beta) = {}^1T_{S\bullet}(f, r, \alpha, \beta) e^{-j\theta_{S\bullet}(f, r, \alpha, \beta)} \quad /2.7/$$

Funkcje ${}^1T_{SL}$ i ${}^1T_{SP}$ reprezentują zmiany amplitud składowych sygnału spowodowane zakłócającym działaniem bryły głowy oraz rozchodzeniem się fali akustycznej. Przyjęto, że wpływ zakłócającego działania bryły głowy oraz rozchodzenia się fali akustycznej na ${}^1T_{SL}$ i ${}^1T_{SP}$ można rozdzielić, to znaczy że:

$${}^1T_{S\bullet}(f, r, \alpha, \beta) = \frac{1}{r} T_{S\bullet}(f, \alpha, \beta) \quad /2.8/$$

Jeśli źródło dźwięku znajduje się w dostatecznie dużej odległości od słuchacza, to zwiększenie tej odległości nie powoduje istotnych zmian funkcji T_{SL} i T_{SP} . Można przyjąć, że warunek /2.8/ jest spełniony, gdy odległość r jest znacznie większa od wymiarów bryły głowy. Zależność zmian funkcji przejścia od odległości, dla modelu ucha ludzkiego umieszczonego w odgradzie, badana była przez Shawa i Teranishiego [57]. Z badań tych wynika, że odległością której zwiększanie nie powoduje istotnych zmian funkcji przejścia jest odległość ok. 20 cm. Ze względu na odpowiednio większe wymiary bryły głowy, w stosunku do wymiarów małżowiny usznej, można przyjąć że odległością r dla całego zewnętrznego systemu słuchowego, której zwiększenie nie powoduje istotnych zmian funkcji T_{SL} i T_{SP} jest odległość 2 metry.

Funkcje przejścia ${}^1H_{SL}$ i ${}^1H_{SP}$ są funkcjami opisującymi stabilne układy przyczynowe. Dla takich układów funkcje przejścia można zapisać w postaci /Oppenheim, Schafer [41]/:

$${}^*H(f) = H(f) \cdot {}^wH(f) \quad /2.9/$$

gdzie: $H(f)$ - funkcja przejścia układu minimalnofazowego,

${}^wH(f)$ - funkcja przejścia układu wszechprzepustowego.

Uwzględniając /2.8/ i /2.9/, zależność /2.7/ można zapisać w postaci:

$${}^1H_{S_0}(f, r, \alpha, \beta) = \frac{1}{r} T_{S_0}(f, \alpha, \beta) e^{-j[\Theta_{S_0}(f, r, \alpha, \beta) + {}^w\Theta_{S_0}(f, r, \alpha, \beta)]} \quad /2.10/$$

Niech:

$$\Theta_{S_0}(f, r, \alpha, \beta) + {}^w\Theta_{S_0}(f, r, \alpha, \beta) = {}^*\Theta_{S_0} = 2\pi f {}^*\tau_{S_0}(f, r, \alpha, \beta) \quad /2.11/$$

Faza Θ_{S_0} związana jest przekształceniem Hilberta z modułem T_{S_0} :

Ponieważ T_{S_0} nie zależy od odległości r , również Θ_{S_0} nie zależy od odległości.

O fazie ${}^w\Theta_S$ założono, że jest fazą liniową, tzn.:

$$w_{\Theta_{S\bullet}}(f, r, \alpha, \beta) = 2\pi f w_{\tau_{S\bullet}}(r, \alpha, \beta) \quad /2.12/$$

Oznacza to, że $w_{\tau_{S\bullet}}$ nie zależy od częstotliwości. Opóźnienie czasowe $w_{\tau_{S\bullet}}$ można rozłożyć na dwa składniki, jeden zależny od odległości r , a drugi od kąta położenia źródła dźwięku:

$$w_{\tau_{S\bullet}}(r, \alpha, \beta) = a_{\tau_{S\bullet}}(r) + b_{\tau_{S\bullet}}(\alpha, \beta) \quad /2.13/$$

$a_{\tau_{S\bullet}}$ reprezentuje czas potrzebny na dojście fali do punktu w którym znajduje się środek bryły głowy słuchacza, a więc:

$$a_{\tau_{S\bullet}}(r) = \frac{r-1}{c} \quad /2.14/$$

$b_{\tau_{S\bullet}}$ reprezentuje opóźnienie czasowe sygnału wprowadzane przez bryłę głowy w stosunku do opóźnienia wynikającego z odległości r , tzn. w stosunku do $a_{\tau_{S\bullet}} \cdot 0$. $b_{\tau_{S\bullet}}$ założono, że nie zależy od kąta β .

W stosunku do opóźnienia wynikającego z odległości r , do bliższego ucha słuchacza sygnał dociera wcześniej o:

$$b_{\tau_1} = \frac{a}{c} \sin \alpha \quad /2.15/$$

gdzie: a - promień kuli modelującej bryłę głowy słuchacza.

Natomiast opóźnienie czasowe pomiędzy sygnałami docierającymi do lewego i prawego ucha słuchacza, można określić z zależności /Żyszkowski [68]/:

$$b_{\tau_2} = \frac{a}{c} (\alpha + \sin \alpha) \quad /2.16/$$

gdzie α należy wyrażać w radianach. Zależność /2.16/ znajduje potwierdzenie w pomiarach wykonanych na słuchaczach /Feddersen, Sandel, Teas, Jeffress [17]/. Uwzględniając /2.15/ i /2.16/, opóźnienie wprowadzane przez bryłę głowy można wyznaczyć z zależności:

$$\begin{aligned} {}^b\tau_{sl}(\alpha) &= \frac{a}{c} [1(\alpha)\alpha + 1(-\alpha)\sin(\alpha)] \\ {}^b\tau_{sp}(\alpha) &= \frac{-a}{c} [1(-\alpha)\alpha + 1(\alpha)\sin(\alpha)] \end{aligned} \quad \left| \quad /2.17/ \right.$$

Reasumując:

$${}^1H_{s.}(f, r, \alpha, \beta) = H_{s.}(f, \alpha, \beta) e^{-j2\pi f {}^w\tau_{s.}(r, \alpha)} \quad /2.18/$$

gdzie: $H_{s.}$ - funkcja przejścia układu minimalnofazowego.

Wykonując odwrotne przekształcenie Fouriera z /2.18/ otrzymano:

$${}^1h_{s.}(t, r, \alpha, \beta) = \frac{1}{r} h_{s.}(t - {}^w\tau_{s.}(r, \alpha), \alpha, \beta) \quad /2.19/$$

gdzie: $h_{s.}(t, \alpha, \beta)$ - odpowiedź impulsowa układu przyczynowego minimalnofazowego.

2.4. Wyznaczenie odpowiedzi impulsowych h_{SL} i h_{SP}

Znane z literatury pomiary zewnętrznego systemu słuchowego: Abbagnaro, Bauer, Torick [1], Bauer, Torick [4], Feddersen, Sendel, Teas, Jeffress [17], Searle, Braida, Cuddy, Davis [52], Shaw [54, 55], Wiener [63], są pomiarami zmierzającymi w sposób bezpośredni lub pośredni do wyznaczenia niektórych charakterystyk zewnętrznego systemu słuchowego człowieka, analogicznych do zdefiniowanych w rozdz. 2.3. Pomiary wykazały, że występują znaczne różnice między charakterystykami zmierzonymi dla różnych słuchaczy. Problem ten przedstawiono w pracach Shawa [56] i Abbagnaro, Bauera, Toricka [1].

Prowadzone w niniejszej pracy rozważania mają w pierwszym rzędzie na celu ocenę systemu stereofonicznego. Ocena ta powinna być przeprowadzona z punktu widzenia określonej grupy słuchaczy. Do opisu zewnętrznego systemu słuchowego należy więc posługiwać się charakterystykami uśrednionymi.

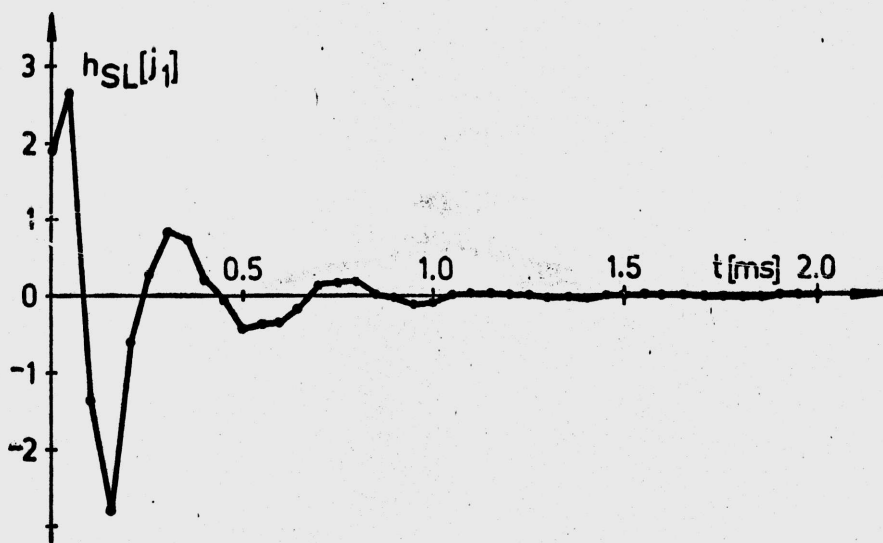
Uśrednienie modułu funkcji przejścia T_{SL} , wykonane na podstawie badań wielu autorów, zostało przeprowadzone przez Shawa [56]. Charakterystyki te przedstawiono w Dodatku B na rys. B.2. Podane przez Shawa moduły funkcji przejścia opisują ich zależność od częstotliwości f i kąta horyzontalnego α . Nie podają natomiast ich zależności od kąta wertykalnego β . W literaturze brak jest uśrednionych charakterystyk opisujących zależność T_{SL} od kąta β .

Zakładając za Shawem symetrię zewnętrznego systemu słuchowego, zachodzi związek:

$$T_{SP}(f, \alpha) = T_{SL}(f, -\alpha) \quad /2.20/$$

Korzystając z faktu, że funkcje H_{SL} i H_{SP} opisują układ minimalnofazowy, możliwe jest za pomocą transformaty Hilberta, określenie argumentów funkcji H_{SL} i H_{SP} na podstawie modułów T_{SL} i T_{SP} . Następnie korzystając z transformaty Fouriera można określić odpowiedzi impulsowe h_{SL} i h_{SP} . Sposób określania funkcji h_{SL} i h_{SP} przedstawiono w Dodatku B.

Na rys. 2.3 tytułem przykładu przedstawiono odpowiedź impulsową $h_{SL}(t, -30^\circ)$ wyznaczoną metodą przedstawioną w Dodatku B.



Rys. 2.3. Odpowiedź impulsowa $h_{SL}(t, -30^\circ)$

2.5. Opis przejścia sygnału od źródła dźwięku do uszu słuchacza w warunkach pogłosowych

W sytuacji, gdy układ źródło dźwięku - słuchacz znajduje się w warunkach pogłosowych, do uszu słuchacza oprócz fali bezpośredniej docierają również fale odbite. Zjawisko odbicia promienia fali od przeszkody można opisać zależnością:

$$x_{2l}(t) = x_{2l-1}(t) * k_l(t) \quad /2.21/$$

gdzie: l - numer odbicia, $x_{2l}(t)$ - sygnał po l -tym odbiciu, $x_{2l-1}(t)$ - sygnał przed l -tym odbiciem, $k_l(t)$ - odpowiedź impulsowa opisująca l -te odbicie.

$k_l(t)$ dane jest zależnością:

$$k_l(t) = FT^{-1}\{K_l(f)\} \quad /2.22/$$

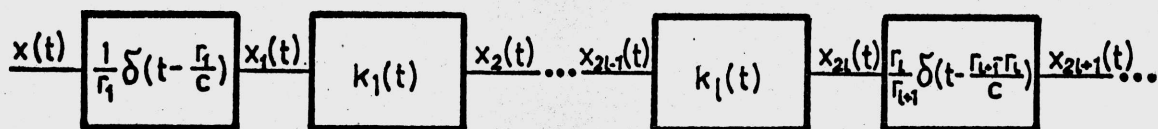
gdzie: $K_l(f)$ - częstotliwościowy przebieg współczynnika odbicia od przeszkody.

Rozchodzenie się promienia fali pomiędzy kolejnymi dwoma odbiciami opisuje zależność:

$$x_{2l+1}(t) = \frac{r_l}{r_{l+1}} x_{2l}(t - \frac{r_{l+1} - r_l}{c}) = \frac{r_l}{r_{l+1}} \delta(t - \frac{r_{l+1} - r_l}{c}) * x_{2l}(t) \quad /2.23/$$

gdzie: $x_{2l+1}(t)$ - sygnał przed $/l+1/-$ ym odbiciem, $x_{2l}(t)$ - sygnał po l -tym odbiciu, r_{l+1} - droga przebyta przez promień fali do $/l+1/-$ go odbicia, r_l - droga przebyta przez promień fali do l -tego odbicia.

Rozpatrując kolejne odbicia od przeszkód i rozchodzenie się promienia fali pomiędzy odbiciami, zjawiska zachodzące podczas rozchodzenia się promienia fali w pomieszczeniu można zamodelować jak przedstawiono na rys. 2.4.



Rys. 2.4. Model rozchodzenia się promienia fali w pomieszczeniu pogłosowym.

Wykonując przekształcenia odpowiadające kolejnym członom, otrzymamy:

$$x_r(t) = \frac{1}{r_r} k_{nr}(t) * \dots * k_{r1}(t) * x(t - \tau_r) \quad /2.24/$$

gdzie: r - /indeks/ numer promienia fali, nr - /indeks/ liczba odbić r -tego promienia fali od ścian pomieszczenia,

r_r - całkowita droga promienia fali, $\tau_r = (r_r - 1)/c$.

Promień fali docierając do słuchacza przekształcany jest przez zewnętrzny system słuchowy:

$$\begin{aligned} u_{or}(t) &= x_r(t) * h_{so}(t - \tau_{sor}, \alpha_r, \beta_r) = \\ &= \frac{1}{r_r} k_{nr}(t) * \dots * k_{r1}(t) * h_{so}(t - \tau_{sor}, \alpha_r, \beta_r) * x(t) \end{aligned} \quad /2.25/$$

gdzie: α_r, β_r - kąty padania promienia fali na słuchacza.

Wypadkowe sygnały docierające do lewego i prawego ucha słuchacza są superpozycją sygnałów wytwarzanych przez falę bezpośrednią i fale odbite. Wypadkowe sygnały można określić z zależności:

$$\begin{aligned} u_L(t) &= \frac{1}{r} h_{SL}(t - \tau_{SL}, \alpha, \beta) * x(t) + \\ &+ \sum_{r=2}^{\infty} \frac{1}{r_r} k_{nr}(t) * \dots * k_{r1}(t) * h_{SL}(t - \tau_{SLr}, \alpha_r, \beta_r) * x(t) \\ u_P(t) &= \frac{1}{r} h_{SP}(t - \tau_{SP}, \alpha, \beta) * x(t) + \\ &+ \sum_{r=2}^{\infty} \frac{1}{r_r} k_{nr}(t) * \dots * k_{r1}(t) * h_{SP}(t - \tau_{SPr}, \alpha_r, \beta_r) * x(t) \end{aligned} \quad /2.26/$$

Zależności /2.26/ można przedstawić w postaci:

$$\begin{aligned} u_L(t) &= x(t) * {}^2h_{SL}(t) \\ u_P(t) &= x(t) * {}^2h_{SP}(t) \end{aligned} \quad \left| \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \\ \\ /2.27/ \end{array}$$

gdzie:

$$\begin{aligned} {}^2h_{SL}(t) &= \frac{1}{r} h_{SL}(t - \tilde{\tau}_{SL}, \alpha, \beta) + \sum_{r=2}^{\infty} \frac{1}{r} k_{mr}(t) * \dots * k_{r1}(t) * h_{SL}(t - \tilde{\tau}_{SLr}, \alpha_r, \beta_r) \\ {}^2h_{SP}(t) &= \frac{1}{r} h_{SP}(t - \tilde{\tau}_{SP}, \alpha, \beta) + \sum_{r=2}^{\infty} \frac{1}{r} k_{mr}(t) * \dots * k_{r1}(t) * h_{SP}(t - \tilde{\tau}_{SPr}, \alpha_r, \beta_r) \end{aligned} \quad \left| \begin{array}{l} \\ \\ /2.28/ \end{array} \right.$$

Opisując sygnał wejściowy za pomocą dwuwymiarowej funkcji autokorelacji, zależności /2.27/ przyjmują postać:

$$\begin{aligned} R_{LL}(t_1, t_2) &= R_{xx}(t_1, t_2) * {}^2h_{SL}(t_1) * {}^2h_{SL}(t_2) \\ R_{PP}(t_1, t_2) &= R_{xx}(t_1, t_2) * {}^2h_{SP}(t_1) * {}^2h_{SP}(t_2) \end{aligned} \quad \left| \begin{array}{l} \\ \\ /2.29/ \end{array} \right.$$

Zależności /2.29/ mają postać analogiczną do zależności /2.5/. Oznacza to, że modelem układu źródło dźwięku - słuchacz w warunkach pogłosowych może być model analogiczny do przedstawionego na rys. 2.2.

W wyniku przeprowadzonych w niniejszym rozdziale rozważań, zbudowane zostały modele opisujące przejście sygnału od źródła dźwięku do błon bębenkowych uszu słuchacza dla odbioru bezpośredniego w warunkach bezpogłosowych i pogłosowych /patrz zal. /2.19/ i /2.28//. W literaturze nie ma takich modeli.

W modelach tych, zewnętrzny system słuchowy opisany jest za pomocą odpowiedzi impulsowych h_{SL} i h_{SP} będących funkcjami czasu i położenia źródła dźwięku względem słuchacza. Odpowiedzi te obliczone zostały /patrz dod. B/ na podstawie podanych przez Shawa [56] modułów funkcji przejścia z pola swobodnego do uszu słuchacza przy założeniu minimalnofazowości tych funkcji /patrz rozdz. 2.3/. Słuszność takiego założenia znajduje potwierdzenie

w dalszych rozważaniach prowadzonych w niniejszej pracy /patrz rozdz. 5.3.1/. Modele dla warunków bezpogłosowych i pogłosowych można sprowadzić do takiej samej struktury przedstawionej na rys. 2.2. Właściwość ta była wykorzystywana w obliczeniach numerycznych /patrz dod. C/.

Przedstawione modele dają możliwość wyznaczenia dwuwymiarowych funkcji autokorelacji sygnałów lewego i prawego ucha, jeśli znana jest dwuwymiarowa funkcja autokorelacji sygnału losowego emitowanego przez źródło dźwięku /patrz zał. /2.5/ i /2.29//. Opisywanie sygnałów za pomocą dwuwymiarowych funkcji autokorelacji daje możliwość uwzględnienia niestacjonarności sygnałów. W badaniach psychofizjologicznych wykazano bowiem, że niestacjonarność sygnałów ma istotny wpływ na lokalizację źródła dźwięku /patrz rozdz. 4.1 i 4.3/.

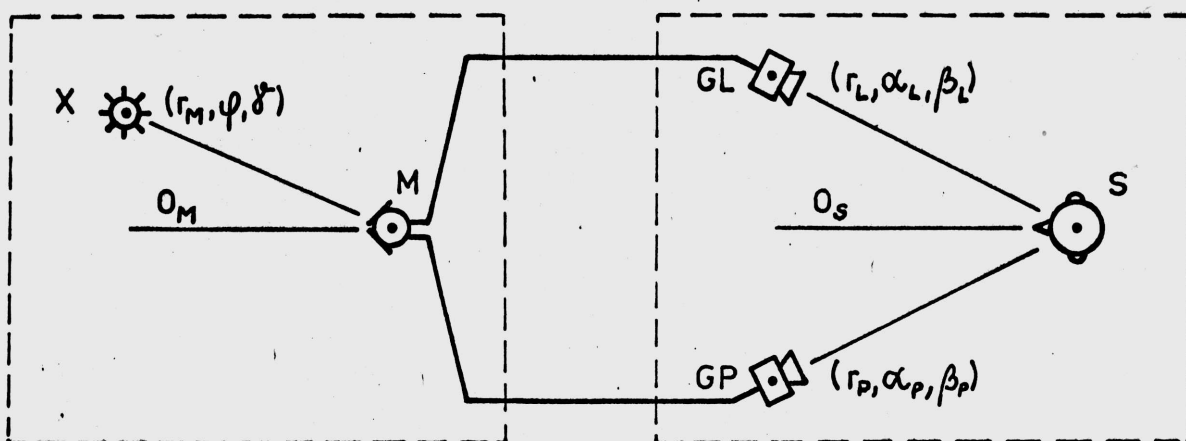
Zależności podane w niniejszym rozdziale stanowią podstawę do przedstawionych w rozdz. 4 i 5 obliczeń parametrów sygnałów dochodzących do uszu słuchacza.

Rozdział 3

OKREŚLENIE SYGNAŁÓW DOCIERAJĄCYCH DO USZU SŁUCHACZA ZA POŚREDNICTWEM DWUKANAŁOWEGO GŁOŚNIKOWEGO SYSTEMU STEREOFONII NATĘŻENIOWEJ

3.1. Wprowadzenie

Zgodnie z założeniami poczynionymi we Wstępie, w niniejszym rozdziale rozpatrzony zostanie system stereofoniczny składający się po stronie nadawczej ze źródła dźwięku i mikrofonu koincydencyjnego, zaś po stronie odbiorczej z układu głośników i słuchacza. Schemat takiego toru przedstawiono na rys. 3.1.



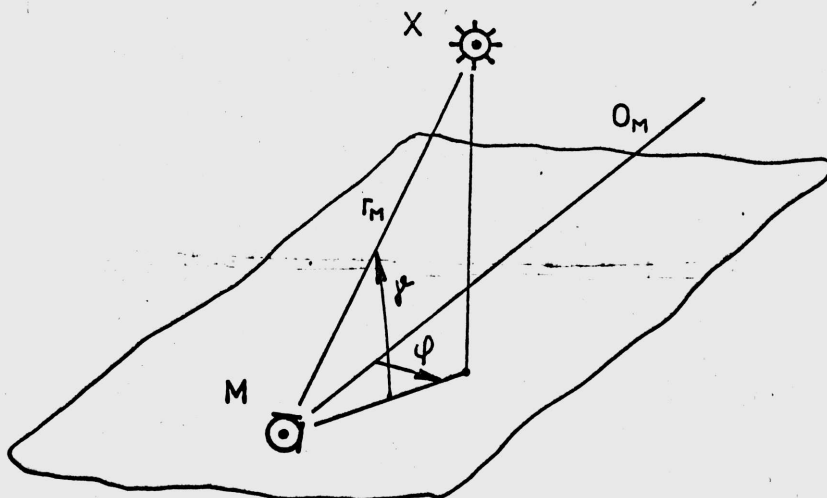
Rys. 3.1. Schemat toru dwukanałowej głośnikowej stereofonii natężeniowej

Na rys. 3.1 oznaczenia (r_M, φ, δ) , (r_L, α_L, β_L) i (r_P, α_P, β_P) opisują odpowiednio położenie źródła dźwięku względem mikrofonu koincydencyjnego oraz położenie lewego i prawego głośnika względem słuchacza.

3.2. Opis przekształceń sygnałów po stronie nadawczej

3.2.1. Analiza w warunkach bezpogłosowych

Usytuowanie źródła dźwięku względem mikrofonu przedstawiono na rys. 3.2.



Rys. 3.2. Położenie źródła dźwięku względem mikrofonu

Niech źródło dźwięku będzie źródłem punktowym. Wtedy, po przeprowadzeniu rozważań analogicznych jak w rozdz. 2.2, przetwarzanie ciśnienia akustycznego, mierzonego w odległości jednostkowej od źródła, na sygnały elektryczne $y_L(t)$ i $y_P(t)$ na wyjściach mikrofonu koincydencyjnego, można opisać za pomocą zależności:

$$y_{\bullet}(t) = \frac{1}{r_M} x(t) * h_{M\bullet}(t - \tau_M, \theta, \phi) \quad /3.1/$$

gdzie: $h_{M\bullet}$ - minimalnofazowe odpowiedzi impulsowe lewego i prawego mikrofonu, $\tau_M = (r_M - 1)/c$.

Odpowiedzi impulsowe h_{ML} i h_{MP} określone są przez odwrotne przekształcenie Fouriera funkcji przejścia H_{ML} i H_{MP} mikrofonów wchodzących w skład mikrofonu koincydencyjnego. Funkcje przejścia H_{ML} i H_{MP} zależą od częstotliwości i kąta położenia

źródła dźwięku względem mikrofonu. Dla odpowiednio dużych odległości r_M funkcje te nie zależą od odległości.

3.2.2. Analiza w warunkach pogłosowych

W warunkach pogłosowych do mikrofonu koincydencyjnego oprócz fali bezpośredniej dochodzą również fale odbite. Rozchodzenie się promienia fali w pomieszczeniu pogłosowym przeanalizowane zostało w rozdz. 2.5. Ciśnienie fali akustycznej, po przebyciu odległości r_{Mr} i po n_r odbiciach od ścian pomieszczenia, można określić z zależności /2.24/:

$$x_r(t) = \frac{1}{r_{Nr}} k_{nr}(t) * \dots * k_{r1}(t) * x(t - \tau_{Nr})$$

Odbite fale akustyczne docierając do mikrofonu przekształcane są na sygnały elektryczne. Sygnały na wyjściach mikrofonów, pochodzące od danego promienia fali odbitej, określone są zależnościami:

$$\begin{aligned} y_{or}(t) &= x_r(t) * h_{M_o}(t, \varphi_r, \vartheta_r) = \\ &= \frac{1}{r_{Nr}} x(t) * k_{nr}(t) * \dots * k_{r1} * h_{M_o}(t - \tau_{Nr}, \varphi_r, \vartheta_r) \end{aligned} \quad \left| \quad /3.2/ \right.$$

gdzie: φ_r, ϑ_r - kąty padania promienia fali na mikrofon.

Całkowite sygnały na wyjściach lewego i prawego mikrofonu są superpozycją sygnałów wytwarzanych przez falę bezpośrednią i fale odbite:

$$\begin{aligned} y_o(t) &= \frac{1}{r_M} x(t) * h_{M_o}(t - \tau_M, \varphi, \vartheta) + \\ &+ \sum_{r=2}^{\infty} \frac{1}{r_{Nr}} x(t) * k_{nr}(t) * \dots * k_{r1}(t) * h_{M_o}(t - \tau_{Nr}, \varphi_r, \vartheta_r) \end{aligned} \quad \left| \quad /3.3/ \right.$$

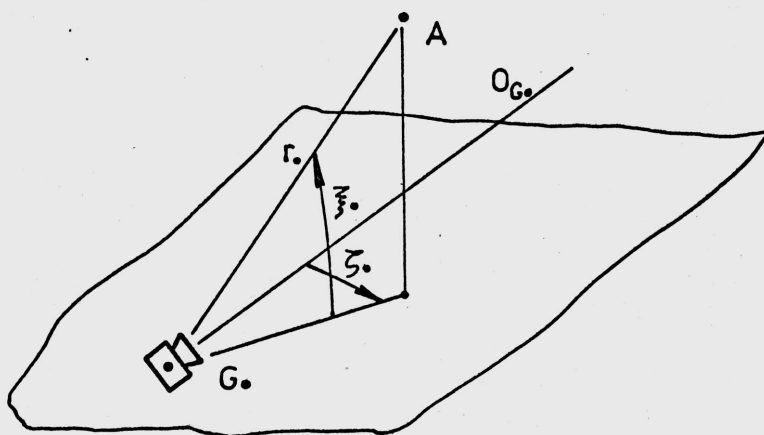
3.3. Opis przekształceń sygnałów po stronie odbiorczej

3.3.1. Określenie ciśnienia akustycznego wytwarzanego przez głośnik w dowolnym punkcie pola swobodnego

Sygnały uzyskiwane z lewego i prawego mikrofonu podawane są następnie na lewy i prawy głośnik. Jeśli głośnik umieszczony jest w przestrzeni swobodnej, to zamianę napięcia podawanego na głośnik na ciśnienie akustyczne w punkcie A przestrzeni, można opisać za pomocą funkcji przejścia ${}^*H_{G.}(f, r., \zeta., \xi.)$. Wtedy sygnał $z.(t)$ w punkcie A przestrzeni można wyznaczyć z zależności:

$$z.(t) = y.(t) * {}^*h_{G.}(t, r., \zeta., \xi.) \quad /3.4/$$

gdzie: ${}^*h_{G.}(t, r., \zeta., \xi.) = FT^{-1}\{ {}^*H_{G.}(f, r., \zeta., \xi.) \}$



Rys. 3.3. Położenie punktu A względem głośnika

Funkcje przejścia H_{GL} i H_{GP} opisują właściwości częstotliwościowe głośników i ich charakterystyki kierunkowości oraz malenia amplitud i opóźnienia czasowe wynikające z odległości r_L i r_P . Istnieje możliwość przedstawienia funkcji przejścia ${}^*H_{G.}$ jako iloczynu minimalnofazowej funkcji przejścia $H_{G.}$ oraz funkcji przejścia układu wszechprzepustowego:

$$^*H_{G_0}(f, r_0, \zeta_0, \xi_0) = H_{G_0}(f, r_0, \zeta_0, \xi_0) e^{-j2\pi \tau_{G_0}^w} \quad /3.5/$$

gdzie: $\tau_{G_0}^w$ - przesunięcie czasowe wynikające z odległości punktu A od środka głośnika, $\tau_{G_0}^w = (r_0 - 1)/c$.

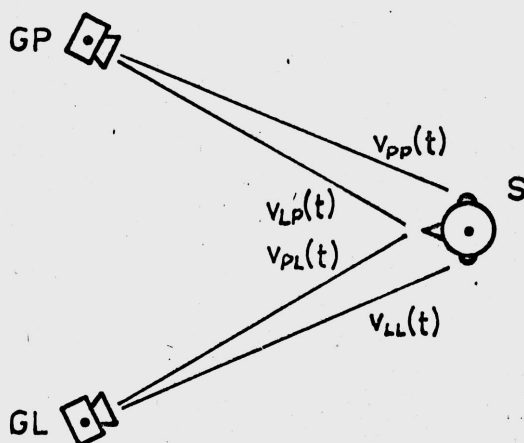
Uwzględniając /3.5/, otrzymano:

$$z_0(t) = y_0(t) * h_{G_0}(t - \tau_{G_0}^w, \zeta_0, \xi_0) \quad /3.6/$$

Z zależności /3.6/ można wyznaczyć ciśnienie akustyczne w punkcie przestrzeni swobodnej wytwarzane przez lewy lub prawy głośnik.

3.3.2. Przekształcanie przez zewnętrzny system słuchowy sygnałów emitowanych przez głośniki

Do uszu słuchacza, w warunkach bezpogłosowych, docierają cztery promienie fal emitowanych przez głośniki. Sytuację taką przedstawia rys. 3.4.



Rys. 3.4. Układ głośniki - słuchacz

Jeśli środek bryły głowy słuchacza umieścić w punkcie A, określonym w rozdz. 3.3.1, to sygnały docierające do uszu słuchacza pochodzące od lewego głośnika, można wyznaczyć z zależności:

$$u_L(t) = z_L(t) * h_{SL}(t, r_L, \alpha_L, \beta_L)$$

$$u_{PL}(t) = z_L(t) * h_{SP}(t, r_L, \alpha_L, \beta_L)$$

/3.7/

gdzie współrzędne (r_L, α_L, β_L) opisują położenie lewego głośnika względem słuchacza. Podstawiając /3.6/ do /3.7/ oraz wykonując proste przekształcenia, otrzymano:

$$u_L(t) = y_L(t) * h_{GL}(t, r_L, \zeta_L, \xi_L) * h_{SL}(t - \tau_{GL}, r_L, \alpha_L, \beta_L)$$

$$u_{PL}(t) = y_L(t) * h_{GL}(t, r_L, \zeta_L, \xi_L) * h_{SP}(t - \tau_{GL}, r_L, \alpha_L, \beta_L)$$

/3.8/

Funkcje h_{SL} i h_{SP} można przedstawić jako splot odpowiedzi impulsowych opisujących układ minimalnofazowy i układ wszechprzepustowy. Wtedy, po wykonaniu przekształceń analogicznych jak w rozdz. 2.3, otrzymano:

$$u_L(t) = y_L(t) * h_{GL}(t, r_L, \zeta_L, \xi_L) * h_{SL}(t - \tau_{SLL}, \alpha_L, \beta_L)$$

$$u_{PL}(t) = y_L(t) * h_{GL}(t, r_L, \zeta_L, \xi_L) * h_{SPL}(t - \tau_{SPL}, \alpha_L, \beta_L)$$

/3.9/

gdzie: h_{SL} , h_{SP} - odpowiedzi impulsowe opisujące zewnętrzny system słuchowy człowieka określone w rozdz. 2.3 i wyznaczone w rozdz. 2.4, a:

$$\tau_{SLL}(r_L, \alpha_L) = \tau_{GL}(r_L) + \tau_{SL}(\alpha_L)$$

$$\tau_{SPL}(r_L, \alpha_L) = \tau_{GL}(r_L) + \tau_{SP}(\alpha_L)$$

/3.10/

Wielkości τ_{SL} i τ_{SP} określone są zależnościami /2.17/.

Przeprowadzając analogiczne rozważania dla przypadku, gdy sygnał emitowany jest przez prawy głośnik, otrzymano:

$$u_P(t) = y_P(t) * h_{GP}(t, r_P, \zeta_P, \xi_P) * h_{SL}(t - \tau_{SLP}, \alpha_P, \beta_P)$$

$$u_{PP}(t) = y_P(t) * h_{GP}(t, r_P, \zeta_P, \xi_P) * h_{SP}(t - \tau_{SPP}, \alpha_P, \beta_P)$$

/3.11/

gdzie:

$$w\tilde{\tau}_{SLP} = w\tilde{\tau}_{GP} + b\tilde{\tau}_{SL}$$

$$w\tilde{\tau}_{SPP} = w\tilde{\tau}_{GP} + b\tilde{\tau}_{SP}$$

/3.12/

Sygnały wytwarzane w uszach słuchacza przez układ głośników, są superpozycją sygnałów wytwarzanych przez lewy i prawy głośnik, czyli:

$$u_L(t) = u_{LL}(t) + u_{LP}(t) =$$

$$= y_L(t) * h_{GL}(t, r_L, \zeta_L, \xi_L) * h_{SL}(t - w\tilde{\tau}_{SL}, \alpha_L, \beta_L) +$$

$$+ y_P(t) * h_{GP}(t, r_P, \zeta_P, \xi_P) * h_{SL}(t - w\tilde{\tau}_{SLP}, \alpha_P, \beta_P)$$

$$u_P(t) = u_{PL}(t) + u_{PP}(t) =$$

$$= y_L(t) * h_{GL}(t, r_L, \zeta_L, \xi_L) * h_{SP}(t - w\tilde{\tau}_{SPL}, \alpha_L, \beta_L) +$$

$$+ y_P(t) * h_{GP}(t, r_P, \zeta_P, \xi_P) * h_{SP}(t - w\tilde{\tau}_{SPP}, \alpha_P, \beta_P)$$

/3.13/

3.4. Opis toru dwukanałowej głośnikowej stereofonii natężeniowej

Podstawiając do /3.13/ zależności /3.3/ otrzymano relacje pomiędzy sygnałami docierającymi do uszu słuchacza a sygnałem emitowanym przez źródło dźwięku. I tak:

$$u_L(t) = x(t) * \left\{ \left[\frac{1}{r_H} h_{HL}(t - w\tilde{\tau}_H, \varphi, \theta) + \sum_{r=2}^{\infty} \frac{1}{r_{Hr}} k_{Hr}(t) * \dots * k_{r1}(t) * h_{HL}(t - w\tilde{\tau}_{Hr}, \varphi_r, \theta_r) \right] * \right.$$

$$* h_{GL}(t, r_L, \zeta_L, \xi_L) * h_{SL}(t - w\tilde{\tau}_{SL}, \alpha_L, \beta_L) +$$

$$+ \left[\frac{1}{r_H} h_{HP}(t - w\tilde{\tau}_H, \varphi, \theta) + \sum_{r=2}^{\infty} \frac{1}{r_{Hr}} k_{Hr}(t) * \dots * k_{r1}(t) * h_{HP}(t - w\tilde{\tau}_{Hr}, \varphi_r, \theta_r) \right] *$$

$$* h_{GP}(t, r_P, \zeta_P, \xi_P) * h_{SL}(t - w\tilde{\tau}_{SLP}, \alpha_P, \beta_P) \}$$

/3.14/

$$\begin{aligned} \sigma_p(t) = & x(t) * \left\{ \left[\frac{1}{r_H} h_{HL}(t - \tilde{t}_H, \varphi, \delta) + \sum_{r=2}^{\infty} \frac{1}{r_{nr}} k_{nr}(t) * \dots * k_{r1}(t) * h_{NL}(t - \tilde{t}_{nr}, \varphi_r, \delta_r) \right] * \right. \\ & * h_{GL}(t, r_L, \zeta_L, \xi_L) * h_{SP}(t - \tilde{t}_{SPL}, \alpha_L, \beta_L) + \\ & + \left. \left[\frac{1}{r_H} h_{HP}(t - \tilde{t}_H, \varphi, \delta) + \sum_{r=2}^{\infty} \frac{1}{r_{nr}} k_{nr}(t) * \dots * k_{r1}(t) * h_{NP}(t - \tilde{t}_{nr}, \varphi_r, \delta_r) \right] * \right. \\ & * h_{GP}(t, r_P, \zeta_P, \xi_P) * h_{SP}(t - \tilde{t}_{SPP}, \alpha_P, \beta_P) \left. \right\} \end{aligned}$$

/3.14/

Zależności /3.14/ można zapisać w postaci:

$$\sigma_L(t) = {}^2h_{NL}(t) * x(t)$$

$$\sigma_P(t) = {}^2h_{NP}(t) * x(t)$$

/3.15/

gdzie:

$$\begin{aligned} {}^2h_{NL}(t) = & \left[\frac{1}{r_H} h_{NL}(t - \tilde{t}_H, \varphi, \delta) + \sum_{r=2}^{\infty} \frac{1}{r_{nr}} k_{nr}(t) * \dots * k_{r1}(t) * h_{NL}(t - \tilde{t}_{nr}, \varphi_r, \delta_r) \right] * \\ & * h_{GL}(t, r_L, \zeta_L, \xi_L) * h_{SL}(t - \tilde{t}_{SLL}, \alpha_L, \beta_L) + \\ & + \left[\frac{1}{r_H} h_{NP}(t - \tilde{t}_H, \varphi, \delta) + \sum_{r=2}^{\infty} \frac{1}{r_{nr}} k_{nr}(t) * \dots * k_{r1}(t) * h_{NP}(t - \tilde{t}_{nr}, \varphi_r, \delta_r) \right] * \\ & * h_{GP}(t, r_P, \zeta_P, \xi_P) * h_{SL}(t - \tilde{t}_{SLP}, \alpha_P, \beta_P) \end{aligned}$$

/3.16/

$$\begin{aligned} {}^2h_{NP}(t) = & \left[\frac{1}{r_H} h_{NL}(t - \tilde{t}_H, \varphi, \delta) + \sum_{r=2}^{\infty} \frac{1}{r_{nr}} k_{nr}(t) * \dots * k_{r1}(t) * h_{NL}(t - \tilde{t}_{nr}, \varphi_r, \delta_r) \right] * \\ & * h_{GL}(t, r_L, \zeta_L, \xi_L) * h_{SP}(t - \tilde{t}_{SPL}, \alpha_L, \beta_L) + \\ & + \left[\frac{1}{r_H} h_{NP}(t - \tilde{t}_H, \varphi, \delta) + \sum_{r=2}^{\infty} \frac{1}{r_{nr}} k_{nr}(t) * \dots * k_{r1}(t) * h_{NP}(t - \tilde{t}_{nr}, \varphi_r, \delta_r) \right] * \\ & * h_{GP}(t, r_P, \zeta_P, \xi_P) * h_{SP}(t - \tilde{t}_{SPP}, \alpha_P, \beta_P) \end{aligned}$$

${}^2h_{NL}$ i ${}^2h_{NP}$ są odpowiedziami impulsowymi opisującymi cały tor dwukanałowej głośnikowej stereofonii natężeniowej w przypadku, gdy źródło dźwięku i mikrofon koincydencyjny znajdują się w warunkach pogłosowych, a układ głośników i słuchacz - w warunkach bezpogłosowych.

Opisując sygnał wejściowy za pomocą dwuwymiarowej funkcji autokorelacji $R_{xx}(t_1, t_2)$, zależności /3.15/ przyjmują postać:

$$\begin{aligned} R_{LL}(t_1, t_2) &= R_{xx}(t_1, t_2) *^2 h_{NL}(t_1) *^2 h_{NL}(t_2) \\ R_{PP}(t_1, t_2) &= R_{xx}(t_1, t_2) *^2 h_{NP}(t_1) *^2 h_{NP}(t_2) \end{aligned} \quad \left| \quad /3.17/ \right.$$

Zależności /3.17/ mają postać analogiczną do zależności /2.5/, a więc modelem rozważanego systemu stereofonicznego może być model analogiczny do modelu przedstawionego na rys. 2.2. .

3.5. Opis teoretycznego systemu dwukanałowej głośnikowej stereofonii natężeniowej

Przy założeniu, że układ źródło dźwięku - mikrofon koincencyjny znajduje się w warunkach bezpogłosowych, zależności /3.14/ przyjmują postać:

$$\begin{aligned} U_L(t) &= X(t) * \left[\frac{1}{r_M} h_{ML}(t - \tilde{t}_M, \varphi, \gamma) * h_{GL}(t, r_L, \zeta_L, \xi_L) * h_{SL}(t - \tilde{t}_{SL}, \alpha_L, \beta_L) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{r_M} h_{MP}(t - \tilde{t}_M, \varphi, \gamma) * h_{GP}(t, r_P, \zeta_P, \xi_P) * h_{SL}(t - \tilde{t}_{SP}, \alpha_P, \beta_P) \right] \\ U_P(t) &= X(t) * \left[\frac{1}{r_M} h_{ML}(t - \tilde{t}_M, \varphi, \gamma) * h_{GL}(t, r_L, \zeta_L, \xi_L) * h_{SP}(t - \tilde{t}_{SP}, \alpha_L, \beta_L) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{r_M} h_{MP}(t - \tilde{t}_M, \varphi, \gamma) * h_{GP}(t, r_P, \zeta_P, \xi_P) * h_{SP}(t - \tilde{t}_{SP}, \alpha_P, \beta_P) \right] \end{aligned} \quad \left| \quad /3.18/ \right.$$

Zakładając następnie, że:

- kąt wertykalny położenia źródła dźwięku względem mikrofonu koincencyjnego jest równy zero, tj. $\gamma = 0^\circ$,
- mikrofony wchodzące w skład mikrofonu koincencyjnego są układami wszechprzepustowymi o zerowym przesunięciu fazowym, tzn. $h_{ML}(t, \varphi) = A_{ML}(\varphi) \cdot \delta(t)$ i $h_{MP}(t, \varphi) = A_{MP}(\varphi) \cdot \delta(t)$, gdzie $\delta(t)$ jest dystrybucją Diraca,
- kąty wertykalne położenia słuchacza względem obydwu głośników są zerowe, tj. $\xi_L = 0^\circ$, $\xi_P = 0^\circ$,

- głośniki są układami wszechprzepustowymi o zerowym przesunięciu fazowym, osie symetrii obydwu głośników przechodzą przez środek bryły głowy słuchacza i ich skuteczności na osiach symetrii są takie same, tzn. $h_{GL}(t, r_L, \zeta_L) = A_G \cdot \delta(t)$,

$$h_{GP}(t, r_P, \zeta_P) = A_G \cdot \delta(t),$$

- kąty wertykalne położenia głośników względem słuchacza są zerowe, tj. $\beta_L = 0^\circ$ i $\beta_P = 0^\circ$,

- odległości obydwu głośników od słuchacza są takie same, tzn.

$$r_L = r_P = r_G,$$

- lewy głośnik umieszczony jest względem słuchacza pod kątem horyzontalnym $\alpha_L = -\mu$, a prawy - pod kątem $\alpha_P = \mu$.

Z ostatnich dwóch założeń wynika, że ${}^w\tau_{SLL} = {}^w\tau_{SPP} = {}^w\tau_{SB}$ i ${}^w\tau_{SLP} = {}^w\tau_{SPL} = {}^w\tau_{SK}$.

Po uwzględnieniu powyższych założeń, zależności /3.18/ przyjmują postać:

$$\begin{aligned} \sigma_L(t) = & x(t) * \left[\frac{1}{r_H} \cdot A_{HL}(\varphi) \cdot A_G \cdot h_{SL}(t - {}^w\tau_H - {}^w\tau_{SB}, -\mu) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{r_H} \cdot A_{HP}(\varphi) \cdot A_G \cdot h_{SL}(t - {}^w\tau_H - {}^w\tau_{SK}, \mu) \right] \\ \sigma_P(t) = & x(t) * \left[\frac{1}{r_H} \cdot A_{HL}(\varphi) \cdot A_G \cdot h_{SP}(t - {}^w\tau_H - {}^w\tau_{SK}, -\mu) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{r_H} \cdot A_{HP}(\varphi) \cdot A_G \cdot h_{SP}(t - {}^w\tau_H - {}^w\tau_{SB}, \mu) \right] \end{aligned}$$

/3.19/

Powyższe założenia sprowadzają rozważany system stereofoniczny do przypadku teoretycznego. W sposób zdecydowany ograniczają one ogólność zależności /3.14/, niemniej jednak pozostawiają wszystkie te właściwości toru stereofonicznego, bez których przekaz stereofoniczny nie byłby możliwy.

Wprowadzając odpowiedzi impulsowe ${}^1h_{NL}(t)$ i ${}^1h_{NP}(t)$ określone jako:

$$\begin{aligned} {}^1h_{NL}(t) &= \frac{1}{r_n} \cdot A_G \cdot [A_{NL}(\varphi) \cdot h_{SL}(t - \tau_n - \tau_{SB}, \kappa) + A_{NP}(\varphi) \cdot h_{SL}(t - \tau_n - \tau_{SK}, \kappa)] \\ {}^1h_{NP}(t) &= \frac{1}{r_n} \cdot A_G \cdot [A_{NL}(\varphi) \cdot h_{SP}(t - \tau_n - \tau_{SK}, \kappa) + A_{NP}(\varphi) \cdot h_{SP}(t - \tau_n - \tau_{SB}, \kappa)] \end{aligned} \quad \left| \begin{array}{l} /3.20/ \end{array} \right.$$

oraz opisując sygnały za pomocą dwuwymiarowych funkcji autokorelacji, zależności /3.19/ przyjmują postać:

$$\begin{aligned} R_{LL}(t_1, t_2) &= R_{xx}(t_1, t_2) * {}^1h_{NL}(t_1) * {}^1h_{NL}(t_2) \\ R_{PP}(t_1, t_2) &= R_{xx}(t_1, t_2) * {}^1h_{NP}(t_1) * {}^1h_{NP}(t_2) \end{aligned} \quad \left| \begin{array}{l} /3.21/ \\ . \end{array} \right.$$

Zależności /3.21/ przez swą analogię do zależności /2.5/, wskazują na możliwość sprowadzenia struktury modelu teoretycznego systemu dwukanałowej głośnikowej stereofonii natężeniowej do struktury przedstawionej na rys. 2.2.

W niniejszym rozdziale zbudowane zostały modele opisujące przejście sygnału od źródła dźwięku do błon bębenkowych uszu słuchacza za pośrednictwem dwukanałowego głośnikowego systemu stereofonii natężeniowej. Przy budowaniu modeli wykorzystane zostały wyniki uzyskane w rozdz. 2. Pierwszy z modeli /patrz zal. /3.16//, uwzględnia wszystkie istotne elementy akustycznej części toru, za wyjątkiem odbić w pomieszczeniu odbiorczym. Ponieważ model ten uwzględnia dużo czynników, przebadanie ich wpływu na sygnały dochodzące do uszu słuchacza wymagałoby obliczeń na dużą skalę. Dlatego też, poprzez wprowadzanie kolejnych założeń, model ten został sprowadzony do modelu mniej skomplikowanego zwanego modelem systemu teoretycznego /patrz. zal. /3.20//.

Przyjęcie takiego modelu zawęży rozważania do płaszczyzny horyzontalnej. Jednak w modelu uwzględnione są wszystkie te czynniki, które zapewniają możliwość wytworzenia pozornego źródła dźwięku.

Obydwa przedstawione modele wykazują wiele zalet w stosunku

do modeli znanych z literatury [5, 7, 29, 68]. Przede wszystkim pozwalają na uwzględnienie widmowej złożoności sygnałów emitowanych przez źródło dźwięku. Poza tym dają możliwość uwzględnienia losowości i niestacjonarności sygnałów. Obydwie te właściwości, jak wykazano w rozdz. 5, 6 i 7, mają istotny wpływ na wrażenie kierunku położenia pozornego źródła dźwięku.

Przedstawione w niniejszym rozdziale zależności stanowią bazę do obliczeń parametrów sygnałów docierających do uszu słuchacza za pośrednictwem systemu stereofonicznego, opisanych w rozdziałach 4 i 5.

Rozdział 4

OKREŚLENIE I WYZNACZENIE NIEKTÓRYCH PARAMETRÓW SYGNAŁÓW Z UWZGLĘDNIENIEM WŁAŚCIWOŚCI ORGANU SŁUCHU CZŁOWIEKA

4.1. Pamięciowość organu słuchu

Obiektywna ocena wrażenia lokalizacji źródła dźwięku wymaga uwzględnienia niektórych właściwości organu słuchu. Jedną z tych właściwości jest pamięciowość słuchu określana w badaniach subiektywnych pojęciem stałej czasowej słuchu [36, 65]. Ocena sygnału docierającego do uszu słuchacza dokonywana jest przez system słuchowy na podstawie fragmentów sygnału. Stała czasowa słuchu określana jako czas potrzebny do uzmysłowienia sobie przez słuchacza odbieranego wrażenia akustycznego, dyskutowana jest przez Winckla [65]. W pracy Miszczaka [36] stała czasowa słuchu rozpatrywana jest z punktu widzenia spostrzegania odbić od ścian pomieszczenia. Przytoczone w niej badania dowodzą, że odbicia od ścian pomieszczenia docierające do uszu słuchacza w odstępach czasowych mniejszych od stałej czasowej słuchu, nie są rozróżniane. Odbicia docierające do słuchacza w czasie nie przekraczającym stałej czasowej, zlewają się w jedno wrażenie głośności /Hass [24]/.

Wśród badaczy poruszających problem stałej czasowej słuchu [20, 24, 31, 36, 39, 50, 65], nie ma zgodności co do długości tej stałej. We wspomnianych pracach, długość stałej czasowej - T_{05} przyjmuje wartości od 30 ms do 100 ms. Nie jest celem tej

pracy rozstrzygnięcie jaka jest faktyczna wartość T_{0S} . Wiadomo, że stała ta jest różna dla różnych osobników i że dodatkowo zależy od innych czynników jak np. od widma odbieranego sygnału. Problem stałej czasowej jest gruntownie analizowany w pracy [36]. Na podstawie badań wielu autorów przyjmuje się, że długość stałej czasowej słuchu wynosi 50 ms.

4.2. Definicja chwilowej funkcji autokorelacji

W świetle przeprowadzonych w rozdz. 4.1 rozważań jest zrozumiałe, że do badania efektu lokalizacji niezbędne jest operowanie chwilowymi parametrami sygnałów. Jednym z takich parametrów jest chwilowa funkcja autokorelacji. Istnieje wiele definicji chwilowej funkcji autokorelacji [2, 3, 10, 18, 22, 40, 50, 51, 59]. Niech punktem wyjścia będzie definicja podana przez Schroedera, Atala [51]:

$$*B(\tau, t_0) = \int_{-\infty}^{t_0} s_{\tau}(x) s_{\tau}(x - |\tau|) W_k(t_0 - x) dx \quad /4.1/$$

gdzie: $*B(\tau, t_0)$ - chwilowa funkcja autokorelacji, $s_{\tau}(t)$ - sygnał /realizacja/, $W_k(t)$ - okno czasowe, $W_k(t) = 0$ dla $t < 0$.

Powyższa definicja pozwala na obliczenie chwilowej funkcji autokorelacji realizacji procesu losowego $s(t)$. Taka definicja jest przydatna, gdy dokonywany jest pomiar. W niniejszej pracy modelem sygnału jest proces losowy i dlatego istnieje potrzeba określenia chwilowej funkcji autokorelacji dla procesu losowego. Z tego powodu definicję /4.1/ należy uzupełnić o operator uśredniania probabilistycznego. Wtedy:

$$\begin{aligned} B(\tau, t_0) &= E \left\{ \int_{-\infty}^{t_0} s_{\tau}(x) s_{\tau}(x - |\tau|) W_k(t_0 - x) dx \right\} = \\ &= \int_{-\infty}^{t_0} E \{ s_{\tau}(x) s_{\tau}(x - |\tau|) \} W_k(t_0 - x) dx = \int_{-\infty}^{t_0} R(x, x - |\tau|) W_k(t_0 - x) dx \end{aligned} \quad /4.2/$$

gdzie: $R(t, t-|\bar{t}|)$ - dwuwymiarowa funkcja autokorelacji procesu $s(t)$ dla $t_1 = t$, $t_2 = t - |\bar{t}|$.

Tak zdefiniowana funkcja autokorelacji jest parzystą funkcją argumentu $\bar{t}$.

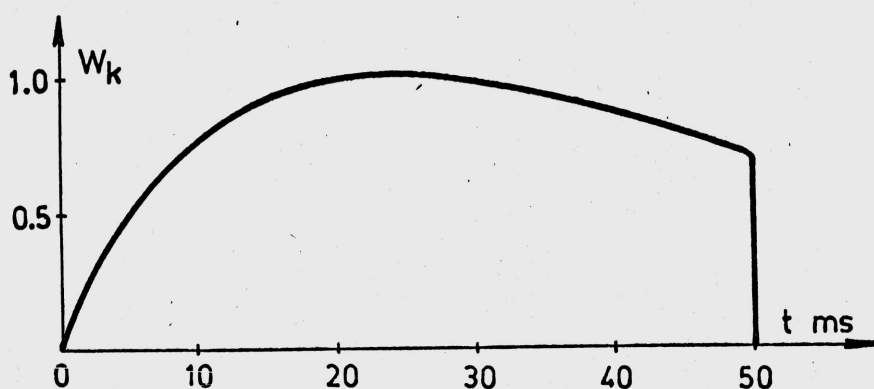
Występujące w definicji chwilowej funkcji autokorelacji okno czasowe $W_k(t)$ stanowić będzie opis stałej czasowej słuchu. W związku z tym funkcja $W_k(t)$ musi przyjmować zerowe wartości poza przedziałem $0 < t < T_{OS}$.

Wśród badaczy nie ma również zgodności co do kształtu okna czasowego opisującego stałą czasową słuchu. W niniejszej pracy stosowany będzie kształt proponowany przez wielu autorów /Duifhuis [15], Penner [43, 44, 45], Robinson, Pollack [47]/. Funkcją aproksymującą ten kształt jest funkcja [40]:

$$W_k(t) = 1(t) \cdot 1(T_{50} - t) \cdot \frac{2t}{T_{50}} \cdot e^{-\frac{2t}{T_{50}}} + 1 \quad /4.3/$$

gdzie: $1(t)$ - jedynka Heaviside'a.

Wykres stosowanego okna czasowego $W_k(t)$ przedstawiono na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Wykres stosowanego okna czasowego $W_k(t)$

4.3. Lokalizacja na podstawie czoła fali

Z badań psychofizjologicznych prowadzonych między innymi przez Hassa [24] i Cremera [11] a diskutowanych w pracy

Miszczaka [36] wynika, że słuchacz dokonuje lokalizacji źródła dźwięku na podstawie "czoła" fali docierającej do jego uszu. "Czoło" fali należy tutaj rozumieć jako tę część fali, która jest wynikiem wznowienia przez źródło emisji dźwięku. Ten początkowy fragment, na skutek opóźnienia fal odbitych w stosunku do fali bezpośredniej, zawiera przede wszystkim falę bezpośrednią. Dzięki tej właściwości organu słuchu człowieka, możliwa jest poprawna lokalizacja źródła dźwięku w pomieszczeniu, mimo że energia fal odbitych jest znacznie większa niż energia fali bezpośredniej. Ta właściwość organu słuchu narzuca potrzebę oceny sygnałów docierających do uszu słuchacza w momentach czasu $t_0 = t_c + T_{OS}$, gdzie t_c oznacza moment dotarcia do słuchacza "czoła" fali.

W celu ukształtowania czoła fali, o sygnale emitowanym przez źródło dźwięku założono, że jest zerowy dla $t < 0$. Prawo lokalizacji źródła dźwięku na podstawie "czoła" fali oraz założenie, że źródło zaczyna emisję w chwili $t = 0$ powodują, że na potrzeby obiektywnej oceny efektu lokalizacyjnego, parametry sygnałów należy wyznaczać dla chwili $t_0 = T_c + T_{OS}$. T_c oznacza czas potrzebny na przejście sygnału od źródła dźwięku do bliższego ucha słuchacza.

4.4. Określenie sygnału emitowanego przez źródło dźwięku

Przedstawione w dalszej części pracy parametry sygnałów docierających do uszu słuchacza, obliczone zostały przy założeniu, że sygnał emitowany przez źródło dźwięku opisany jest przez dwuwymiarową funkcję autokorelacji następującej postaci:

$$R_{xx}(t_1, t_2) = {}^2\delta(t_1, t_2)$$

/4.4/

gdzie: ${}^2\delta(t_1, t_2)$ - dystrybucja Diraca w przestrzeni dwuwymiarowej.

Dystrybucja ${}^2\delta(t_1, t_2)$ zdefiniowana jest następująco [8]:

$${}^2\delta(t_1, t_2) = \begin{cases} 0, & t_1^2 + t_2^2 \neq 0 \\ \infty, & t_1^2 + t_2^2 = 0 \end{cases} \quad \left| \quad /4.5/ \right.$$

Możliwe jest wprowadzenie dwuwymiarowej odpowiedzi impulsowej układu niezmiennego w czasie, zdefiniowanej jako:

$$h(t_1, t_2) = h(t_1) \cdot h(t_2) \quad \left| \quad /4.6/ \right.$$

Wtedy, korzystając z właściwości dystrybucji ${}^2\delta(t_1, t_2)$ opisującej sygnał niestacjonarny emitowany przez źródło dźwięku, dwuwymiarowe funkcje autokorelacji sygnałów docierających do uszu słuchacza, określone są zależnościami:

$$\begin{aligned} R_{LL}(t_1, t_2) &= h_L(t_1, t_2) \\ R_{PP}(t_1, t_2) &= h_P(t_1, t_2) \end{aligned} \quad \left| \quad /4.7/ \right.$$

gdzie: $h_L(t_1, t_2)$, $h_P(t_1, t_2)$ - dwuwymiarowe odpowiedzi impulsowe opisujące dowolny tor przesyłowy od źródła dźwięku do lewego i prawego ucha słuchacza.

4.5. Wprowadzenie czasu dyskretnego

Zakładając, że odpowiedzi impulsowe $h_{\bullet}(t)$ torów przesyłowych od źródła dźwięku do ucha słuchacza opisują układy dolno-przepustowe o górnej częstotliwości granicznej f_g , na mocy twierdzenia Shannona - Kotielnikowa [66], funkcje $h_{\bullet}(t)$ można przedstawić w postaci nieskończonych ciągów, których wyrazy dane są w odstępach czasowych Δ nie większych niż $1/f_g$. Przyjęto,

że $\Delta = 50 \mu s$, co odpowiada częstotliwości granicznej $f_g = 10 \text{ kHz}$.

Początkowy fragment dwuwymiarowej odpowiedzi impulsowej $h_*(t_1, t_2)$, w dziedzinie czasu dyskretnego, można przedstawić w postaci macierzy kwadratowej $h_*(k, l) = [h_*(k, l)] \quad k, l = 0, \dots, p$. Zakładając, że szerokość widma emitowanego przez źródło dźwięku jest ograniczona przez f_g , w postaci macierzy $R_{xx}(k, l)$ i $R_{**}(k, l)$ można również przedstawić dwuwymiarowe funkcje autokorelacji $R_{xx}(t_1, t_2)$ i $R_{**}(t_1, t_2)$.

Uwzględniając, że dwuwymiarowa odpowiedź impulsowa jest funkcją przyczynową, w ogólnym przypadku elementy macierzy R_{**} można wyznaczyć z zależności:

$$R_{**}(k, l) = \sum_{r=0}^p \sum_{s=0}^p R_{xx}(k-r, l-s) h_*(r, s) \quad /4.8/$$

W szczególnym przypadku rozważanym w niniejszej pracy, macierz $R_{**}(t_1, t_2)$ dana jest wprost przez macierz $h_*(t_1, t_2)$ /patrz. zał. /4.7//, tj.:

$$\begin{aligned} R_{LL}(k, l) &= h_L(k, l) \\ R_{PP}(k, l) &= h_P(k, l) \end{aligned} \quad \left| \quad /4.9/ \right.$$

Natomiast chwilowa funkcja autokorelacji, może być obliczona z zależności:

$$B(\tau, t_0) = \sum_{j=t_0-T_0}^{t_0} R(j, j-\tau) \cdot W_k(t_0-j) \quad /4.10/$$

4.6. Wyniki obliczeń

Wykonano obliczenia chwilowych funkcji autokorelacji $B_L(\tau, T_0)$ i $B_P(\tau, T_0)$ dla trzech sytuacji. Pierwsza z nich to bezpośredni odbiór sygnału emitowanego przez źródło dźwięku w wa-

runkach bezpogłosowych. Dla wyróżnienia wyniki uzyskane dla takiej sytuacji oznaczono indeksem ^B np. B_{L}^{B} . Druga sytuacja to odbiór bezpośredni w warunkach występowania odbić od ścian pomieszczenia.

Trzecia rozważana sytuacja, to odbiór za pośrednictwem dwukanałowej głośnikowej stereofonii natężeniowej sprowadzonej do przypadku teoretycznego /patrz. rozdz. 3.5/. W ramach trzeciej sytuacji rozważono dwa typy charakterystyk kierunkowości mikrofonów wchodzących w skład mikrofonu koincydencyjnego:

1. charakterystyki kardiodalne, dla których charakterystyki kierunkowości dane są zależnościami:

$$\begin{aligned} A_{\text{ML}}(\varphi) &= \frac{1}{2}(1 + \cos(\varphi + \pi/4)) \\ A_{\text{MP}}(\varphi) &= \frac{1}{2}(1 + \cos(\varphi - \pi/4)) \end{aligned} \quad \left| \begin{array}{l} \\ /4.11/ \end{array} \right.$$

2. charakterystyki ósemkowe /dwukierunkowe/, dla których:

$$\begin{aligned} A_{\text{ML}}(\varphi) &= \sin(3/4\pi + \varphi) \\ A_{\text{MP}}(\varphi) &= \sin(1/4\pi + \varphi) \end{aligned} \quad \left| \begin{array}{l} \\ /4.12/ \end{array} \right.$$

Jak wynika z zależności /4.11/ i /4.12/ dla obydwu typów charakterystyk przyjęto, że kąt między osiami mikrofonów wynosi 90° . W obliczeniach uwzględniono również dwa warianty kąta rozstawienia głośników: $2\mathcal{H} = 90^\circ$ i $2\mathcal{H} = 60^\circ$.

W zależności od typu charakterystyk mikrofonów i wariantu kąta rozstawienia głośników, powstały cztery przypadki systemu stereofonicznego:

1. mikrofon składa się z mikrofonów o kardiodalnych charakterystykach kierunkowości a kąt rozstawienia głośników wynosi 90° -
- przypadek MK90,
2. mikrofon składa się z mikrofonów o kardiodalnych charakterys-

tykach kierunkowości a kąt rozstawienia głośników wynosi 60°
- przypadek MK60,

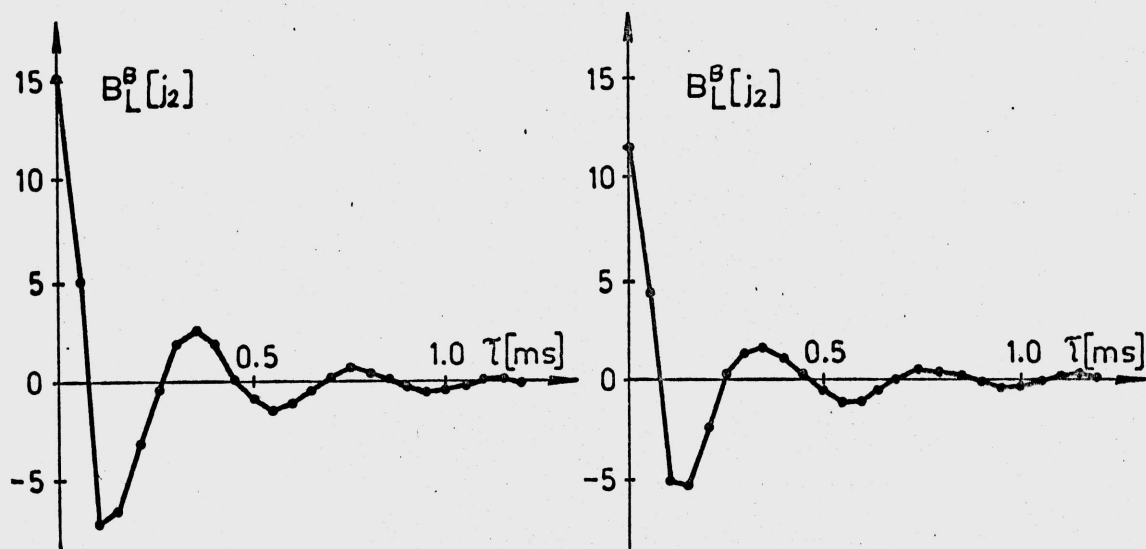
3. mikrofon koincydencyjny składa się z mikrofonów o ósemkowych charakterystykach kierunkowości a kąt rozstawienia głośników wynosi 90° - przypadek M090,

4. mikrofon koincydencyjny składa się z mikrofonów o ósemkowych charakterystykach kierunkowości a kąt rozstawienia głośników wynosi 60° - przypadek M060.

Dodatkowo przyjęto, że $r_M = 3m$ i $A_G = 1/3$.

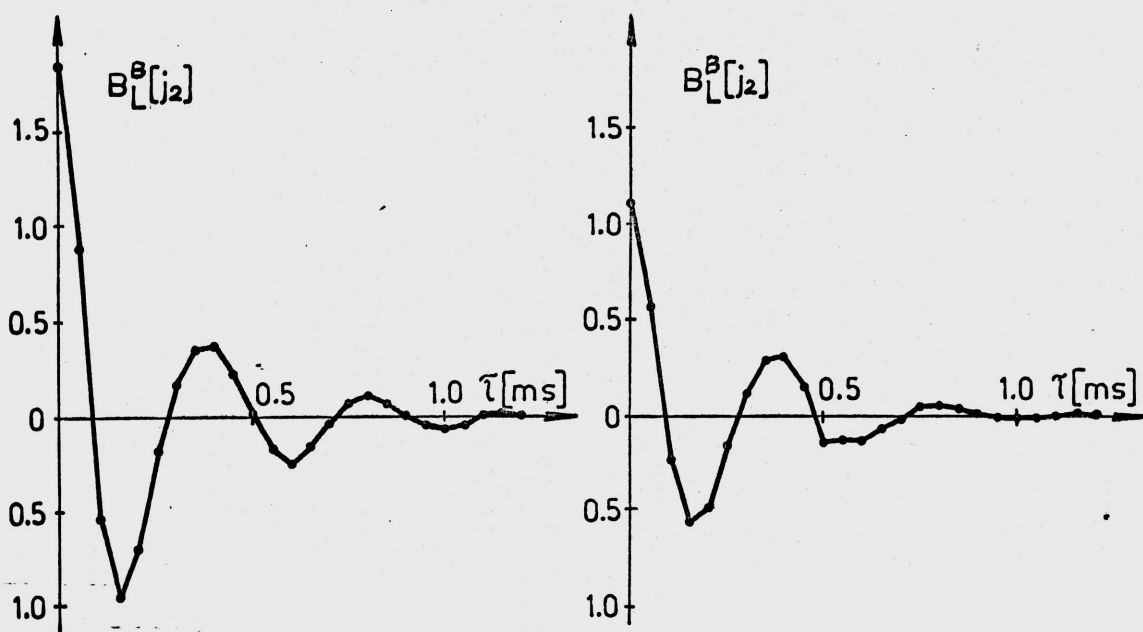
Schematy blokowe programów do obliczania odpowiedzi impulsowych ${}^2h_{S.}$ i ${}^1h_{N.}$ oraz chwilowych funkcji autokorelacji przedstawiono w Dodatku C.

Tytułem przykładu, na rys. 4.2 i 4.3 przedstawiono obliczone chwilowe funkcje autokorelacji B_L^B dla różnych kątów α położenia źródła dźwięku względem słuchacza.

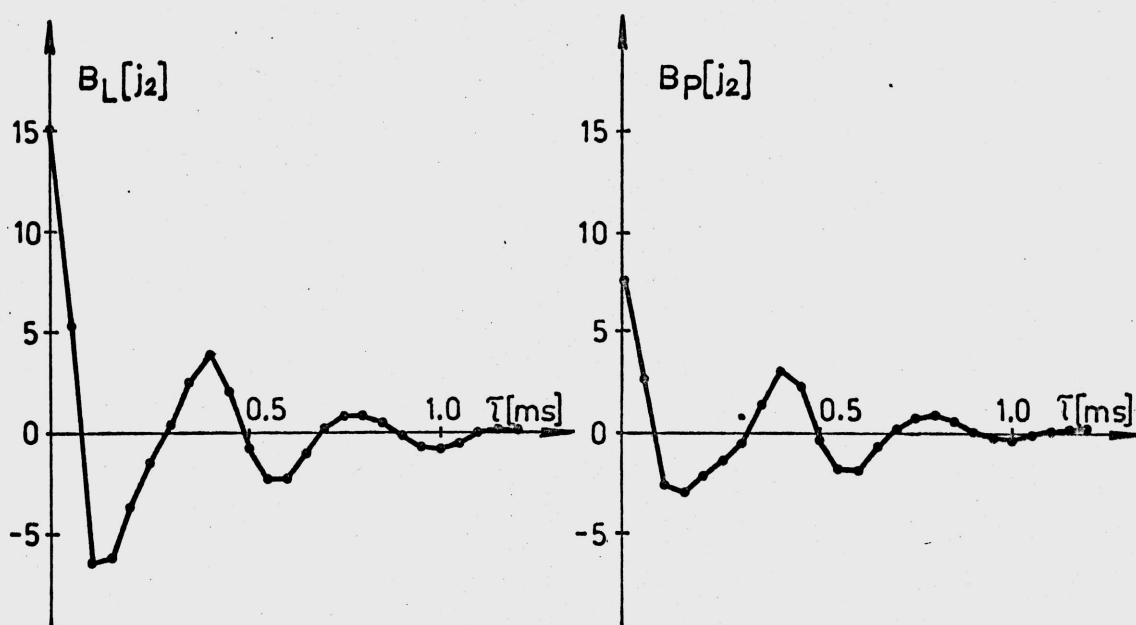


Rys. 4.2. Chwilowe funkcje autokorelacji B_L^B dla kątów $\alpha = -45^\circ$ i $\alpha = -30^\circ$

Na rys. 4.4 przedstawiono chwilowe funkcje autokorelacji B_L i B_P dla przypadku MK90, gdy źródło dźwięku znajduje się względem mikrofonu pod kątem $\varphi = -30^\circ$.

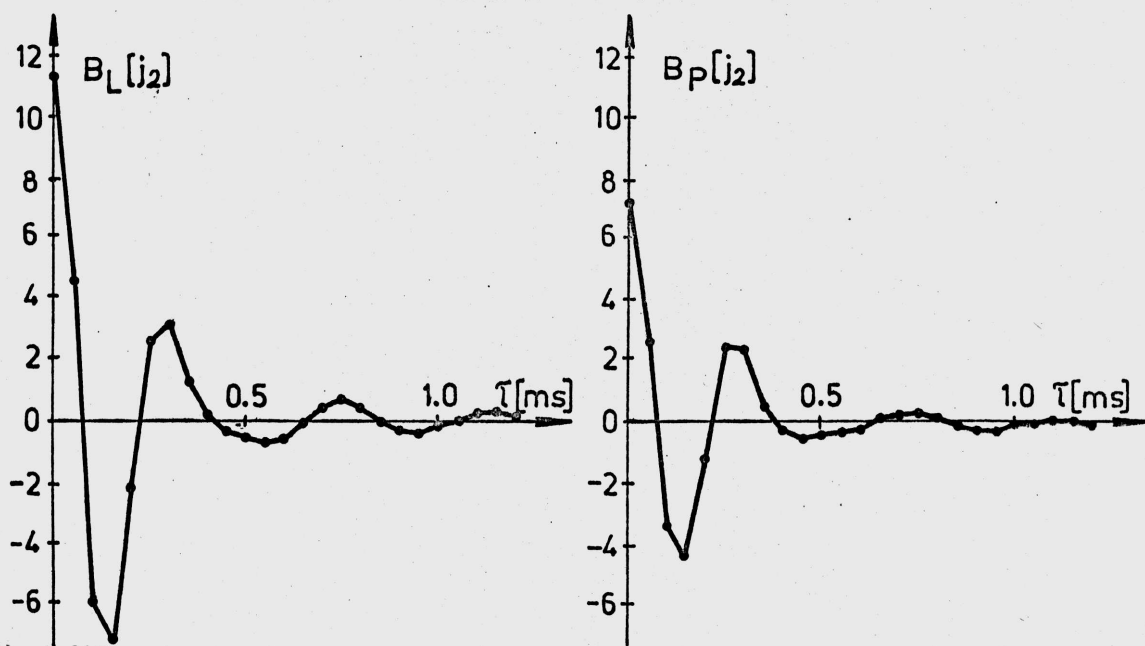


Rys. 4.3. Chwilowe funkcje autokorelacji B_L^B dla kątów $\alpha = 30^\circ$ i $\alpha = 45^\circ$



Rys. 4.4. Chwilowe funkcje autokorelacji B_L i B_P dla przypadku MK90 dla $\varphi = -30^\circ$

Z kolei na rys. 4.5 przedstawiono chwilowe funkcje autokorelacji B_L i B_P dla przypadku MK60, gdy źródło dźwięku znajduje się względem mikrofonu pod kątem $\varphi = -30^\circ$.



Rys. 4.5. Chwilowe funkcje autokorelacji B_L i B_P dla przypadku MK60 i dla $\varphi = -30^\circ$

W rozdziale niniejszym zdefiniowana została chwilowa funkcja autokorelacji określona na bazie dwuwymiarowej funkcji autokorelacji /patrz zal. /4.2//. Wprowadzenie chwilowej funkcji autokorelacji podyktowane było potrzebą uwzględnienia, w obiektywnej ocenie sygnałów docierających do uszu słuchacza, pamięciowości organu słuchu opisywanej pojęciem stałej czasowej /patrz rozdz. 4.1 i 4.2/. Z drugiej strony, taki parametr sygnału daje możliwość uwzględnienia niestacjonarności sygnału a więc uwzględnienia prawa lokalizacji źródła dźwięku na podstawie "czoła fali" /patrz rozdz. 4.3/.

W dalszej części rozdziału, w celu wykonania obliczeń, przyjęto że dwuwymiarowa funkcja autokorelacji sygnału emitowanego przez źródło dźwięku opisana jest za pomocą dwuwymiarowego impulsu Diraca /patrz rozdz. 4.4/. Poza tym wykonano obliczenia dla różnych przypadków odbioru sygnału emitowanego przez źródło dźwięku. Przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono w rozdz. 4.6.

Definicja chwilowej funkcji autokorelacji pozwala na zdefiniowanie parametrów lokalizacyjnych sygnałów /patrz rozdz. 5.2/, a wyniki obliczeń stanowią bazę do dalszych obliczeń.

Rozdział 5

OKREŚLENIE I WYZNACZENIE PARAMETRÓW LOKALIZACYJNYCH

5.1. Eksperymentalne określenie parametrów lokalizacyjnych

Słuchacz dokonuje lokalizacji źródła dźwięku na podstawie parametrów sygnałów docierających do jego uszu. Dotychczasowe badania psychofizjologiczne [9, 17, 21, 24, 25, 26, 29, 31, 35, 53, 56, 68] wykazały, że słuchacz dokonuje oceny kierunku położenia źródła dźwięku na podstawie następujących parametrów sygnałów:

- jednousznych poziomów ciśnienia dźwięku,
- międzyusznej różnicy poziomów ciśnienia dźwięku,
- międzyusznego opóźnienia czasowego.

Parametry te, zwane parametrami lokalizacyjnymi, stanowić będą podstawę do przeprowadzonej w niniejszej pracy obiektywnej oceny efektu lokalizacji źródeł dźwięku.

5.2. Matematyczne określenie parametrów lokalizacyjnych

W celu uzyskania możliwości obiektywnej analizy efektu lokalizacji, istnieje potrzeba matematycznego określenia parametrów lokalizacyjnych. Parametry te, ze względu na stochastyczny charakter sygnałów odbieranych przez słuchacza, powinny być określone w ramach korelacyjnej teorii sygnałów. W rozdziale 4 zdefiniowana została chwilowa funkcja autokorelacji sygnałów docierających do uszu słuchacza. Definicja ta uwzględnia właś-

ciwości organu słuchu człowieka a w szczególności skończoną pojemność informacyjną. W tej sytuacji możliwe jest określenie parametrów lokalizacyjnych poprzez zastosowanie uogólnienia twierdzenia Wienera - Chinczyna na przypadek chwilowych funkcji autokorelacji i chwilowych widm mocy.

Problemem uogólnienia twierdzenia Wienera - Chinczyna zajmowali się między innymi Fano [16], Niewiadomski [40] oraz Schroeder i Atal [51]. W niniejszej pracy wykorzystany zostanie związek pomiędzy chwilowym widmem mocy a chwilową funkcją autokorelacji podany przez Schroedera i Atala [51], w którym widmo zwane jest chwilowym widmem mocy trzeciego rodzaju:

$$S(f, t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\tau, t_0) W_W(|\tau|) \cos 2\pi f \tau d\tau \quad /5.1/$$

gdzie: $S(f, t_0)$ - chwilowe widmo mocy trzeciego rodzaju,

$B(\tau, t_0)$ - chwilowa funkcja autokorelacji, $W_W(\tau)$ - okno korelacyjne.

Od okna wymaga się, aby $W_W(\tau) = 0$ dla $\tau < 0$. Przyjęto prostokątny kształt okna korelacyjnego, tzn.:

$$W_W(\tau) = 1(\tau) \cdot 1(T_{s0} - \tau) \quad /5.2/$$

gdzie: $1(\tau)$ - jedynka Heavisidea.

W związku z wprowadzeniem definicji chwilowego widma mocy, w ramach korelacyjnej teorii sygnałów, parametrom lokalizacyjnym znanym z badań psychofizjologicznych odpowiadają następujące parametry sygnałów:

- poziomowi ciśnienia dźwięku odpowiada poziom chwilowego widma mocy sygnału docierającego do lewego lub prawego ucha słuchacza:

$$L_{S_0}(f, t_0) = 10 \log S_0(f, t_0) \quad /5.3/$$

- międzyuszej różnicy poziomów ciśnienia dźwięku odpowiada

różnica poziomów chwilowych widm mocy sygnałów docierających do lewego i prawego ucha słuchacza:

$$\Delta L_S(f, t_0) = L_{SL}(f, t_0) - L_{SP}(f, t_0) \quad /5.4/$$

gdzie: L_{SL} , L_{SP} - poziomy chwilowych widm mocy,
- międzyuszną opóźnienie czasowe zdefiniowano jako:

$$C_S(f, t_0) = {}^*\tau_{SL}(f, t_0) - {}^*\tau_{SP}(f, t_0) \quad /5.5/$$

gdzie: ${}^*\tau_{SL}$, ${}^*\tau_{SP}$ - opóźnienia czasowe związane z falą bezpośrednią opisujące czasy przejścia sygnału od źródła dźwięku do lewego i prawego ucha słuchacza.

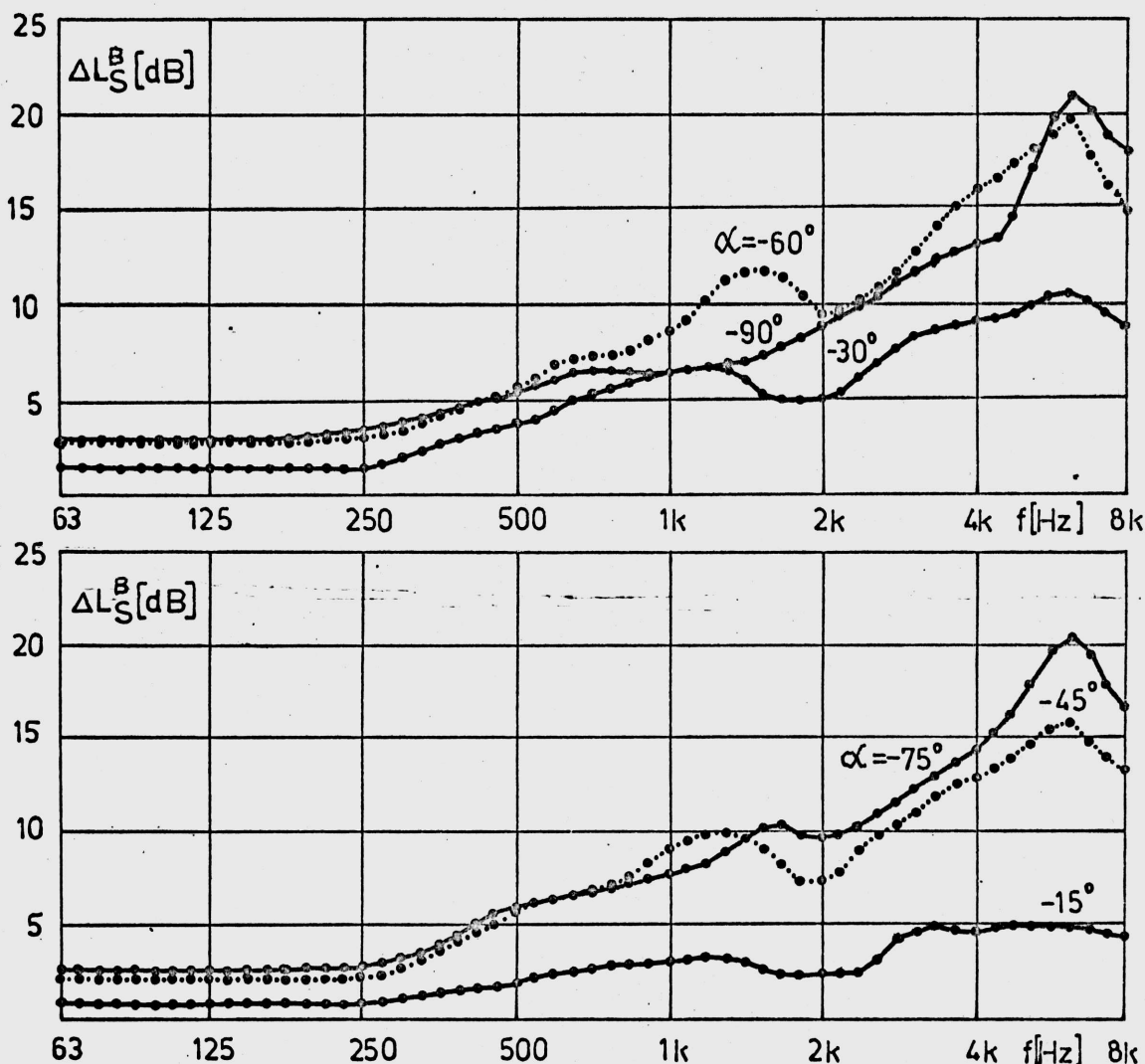
5.3. Parametry lokalizacyjne dla odbioru bezpośredniego

5.3.1. Analiza wyników obliczeń dla warunków bezpogłosowych

Na podstawie chwilowych funkcji autokorelacji, obliczonych według zasad przedstawionych w rozdz. 4, obliczono parametry lokalizacyjne L_{SL}^B , L_{SP}^B i ΔL_S^B dla bezpośredniego odbioru sygnału emitowanego przez źródło dźwięku, umieszczone pod różnymi kątami α względem słuchacza. Schemat blokowy programu do obliczania parametrów lokalizacyjnych L_{SL} , L_{SP} i ΔL_S na podstawie chwilowych funkcji autokorelacji B_L i B_P przedstawiono w Dodatku C.

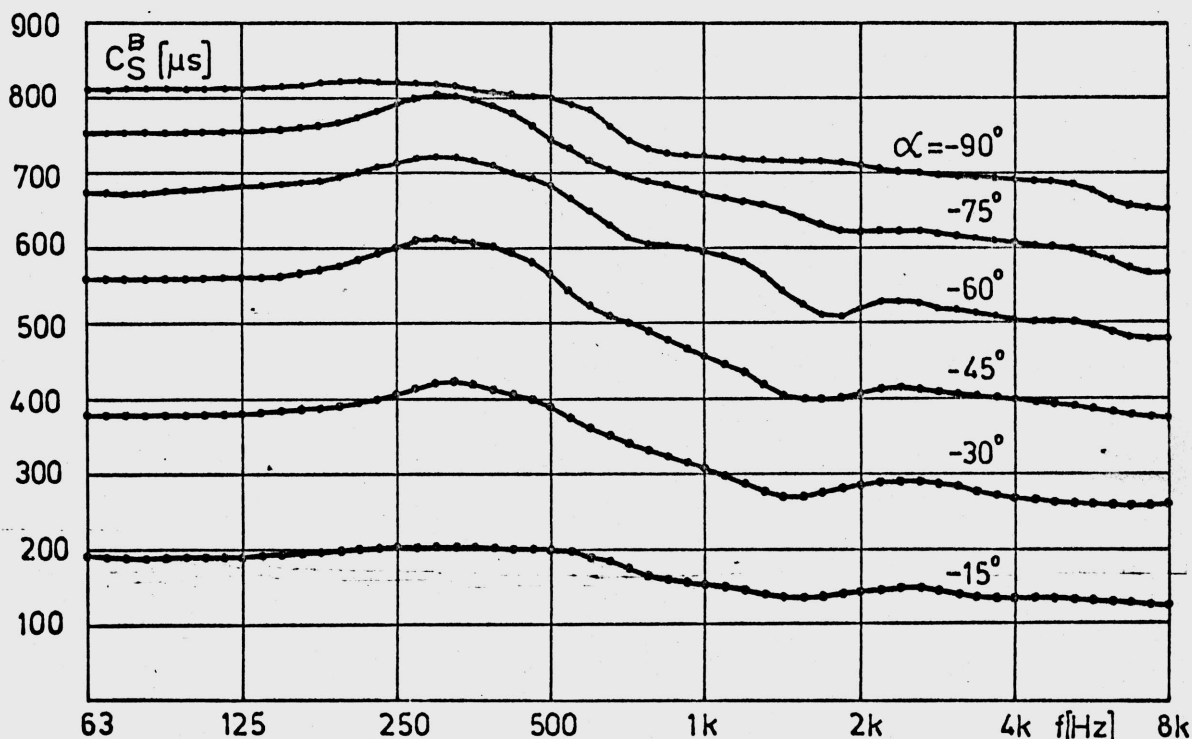
Ponieważ przyjęto, że źródło emituje sygnał opisany za pomocą dwuwymiarowej funkcji autokorelacji $R_{xx}(t_1, t_2) = {}^2\delta(t_1, t_2)$ zależności parametrów L_{SL}^B i L_{SP}^B od częstotliwości są zbieżne z zależnościami modułów funkcji przejścia T_{SL} i T_{SP} od f .

Na rys. 5.1 przedstawiono wykresy różnicy poziomów ΔL_S^B w funkcji częstotliwości przy kącie α jako parametr. Międzyuszną opóźnienie czasowe C_S^B obliczono na podstawie definicji /5.5/, zależności /2.11/ i /2.17/ oraz wyników przedstawionych w Dodat-



Rys. 5.1. Różnica poziomów chwilowych widm mocy ΔL_S^B dla odbioru bezpośredniego dla różnych kątów położenia źródła dźwięku względem słuchacza /kąt α /

ku B. Wykresy opóźnienia czasowego C_S^B przedstawiono na rys. 5.2. Na rys. 5.1 i 5.2 podano zależności ΔL_S^B i C_S^B od częstotliwości tylko dla ujemnych kątów α , gdyż ze względu na założoną symetrię bryły głowy, funkcje te są nieparzystymi funkcjami kąta α . Przedstawione na rys. 5.2 zależności opóźnienia czasowego C_S^B od częstotliwości i kąta α określone na drodze teoretycznej, wykazują dobrą zgodność z zależnościami ustalonymi przez Abbagnaro, Bauera i Toricka [1] na drodze pomiarowej. Jest to dobre potwierdzenie słuszności poczynionych w rozdz. 2.3 założeń.



Rys. 5.2. Międzyuszne opóźnienie czasowe C_S^B dla odbioru bezpośredniego dla różnych kątów położenia źródła dźwięku względem słuchacza /kąt α /

5.3.2. Analiza wyników obliczeń dla warunków pogłosowych

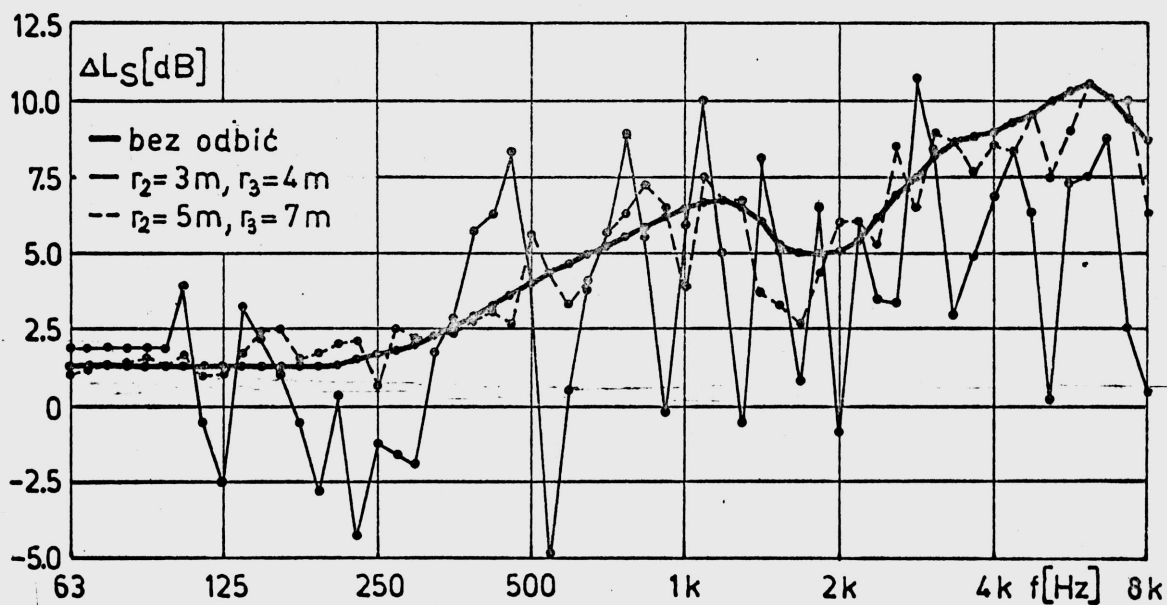
Na podstawie zależności z rozdz. 2.5 obliczono parametry lokalizacyjne L_{SL} , L_{Sp} i ΔL_S sygnałów odbieranych w warunkach odbioru bezpośredniego, przy występowaniu odbić od ścian pomieszczenia. Obliczenia wykonano przy następujących dodatkowych założeniach:

- do słuchacza docierają dwa promienie fali odbitej rozchodzące się w płaszczyźnie horyzontalnej,
- każdy z promieni fali odbitej uległ jednokrotnemu odbiciu,
- wskaźniki odbicia od ścian pomieszczenia nie zależą od częstotliwości, tzn. $k_{r1}(t) = K_{r1} \cdot \delta(t)$.

Powyższe założenia powodują, że obydwa promienie fali odbitej w pełni opisane są następującymi parametrami: r_r , α_r , K_{r1} .

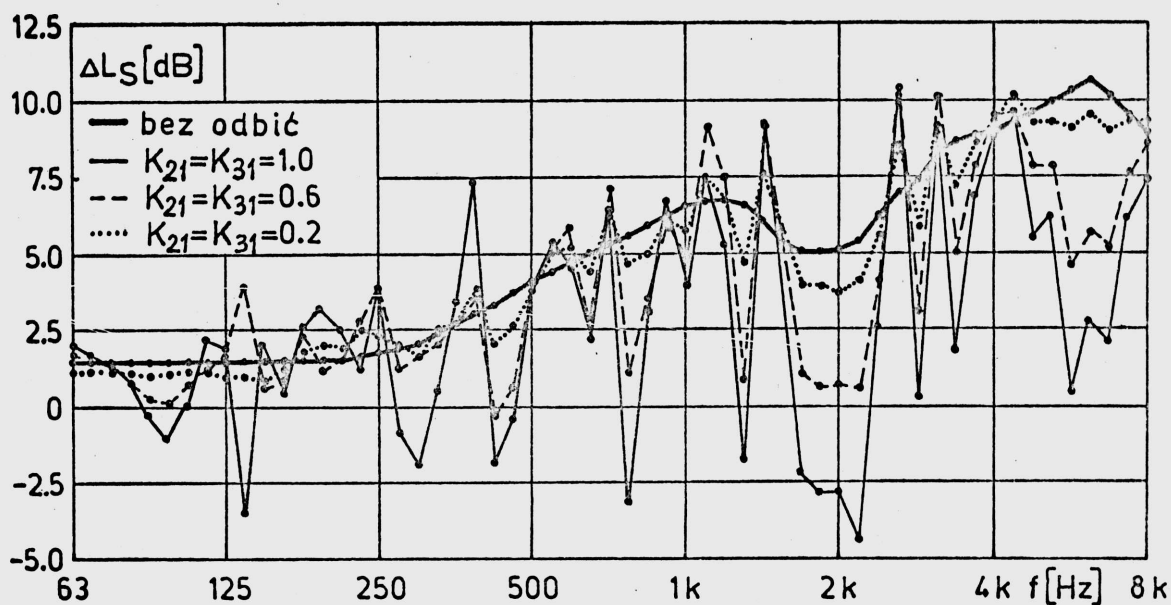
Niektóre z uzyskanych wyników obliczeń przedstawiono na

rys. 5.3 - 5.5. Rys. 5.3 ilustruje wpływ drogi przebytej przez promienie fali odbitej na różnicę poziomów ΔL_S , przy niezmiennych pozostałych parametrach fal odbitych.



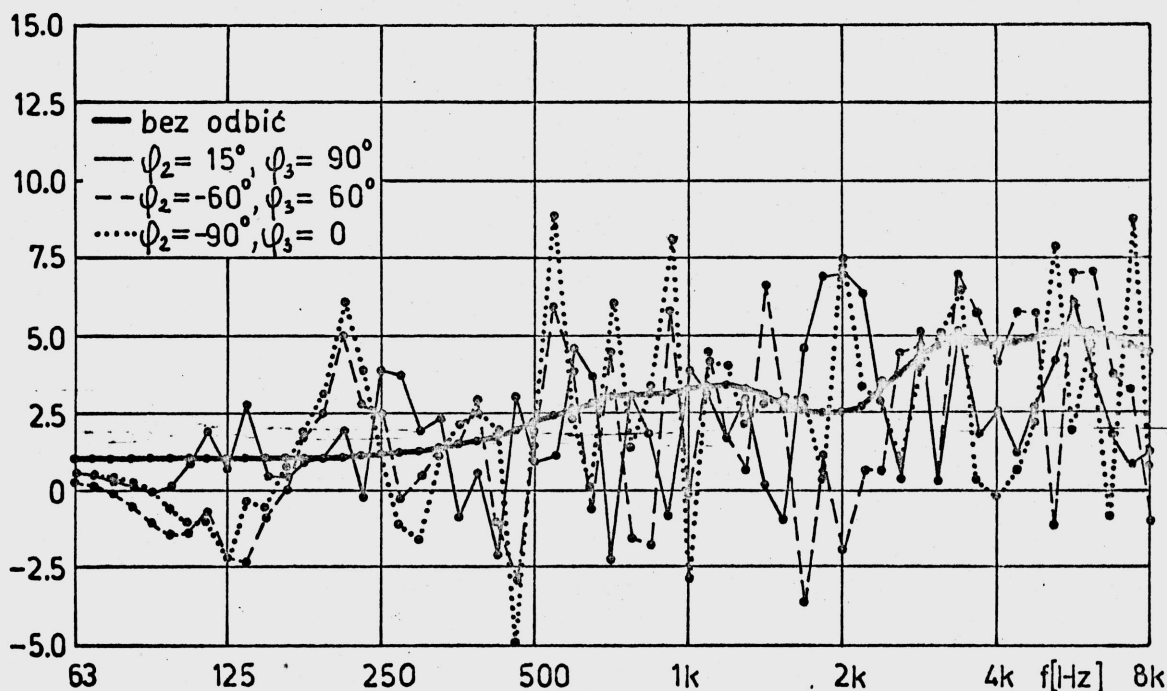
Rys. 5.3. Wpływ drogi przebytej przez promienie fali odbitej na parametr ΔL_S . $r = 2m$, $\alpha = -30^\circ$, $\alpha_2 = -60^\circ$, $\alpha_3 = 60^\circ$, $K_{21} = K_{31} = 0.6$

Rys. 5.4 ilustruje wpływ współczynników odbicia K_{r1} na różnicę poziomów ΔL_S .



Rys. 5.4. Wpływ współczynników odbicia K_{r1} na różnicę poziomów ΔL_S . $r = 2m$, $r_2 = 4m$, $r_3 = 5m$, $\alpha = -30^\circ$, $\alpha_2 = -60^\circ$, $\alpha_3 = 60^\circ$

Z kolei rys. 5.5 ilustruje zmiany jakim ulega różnica poziomów ΔL_S przy zmianie kątów padania promieni fali odbitej na słuchacza.



Rys. 5.5. Wpływ kątów padania promieni fali odbitej na różnicę poziomów ΔL_S . $r = 2\text{m}$, $r_2 = 4\text{m}$, $r_3 = 5\text{m}$, $\alpha = -15^\circ$,
 $K_{21} = K_{31} = 0.6$

Z rys. 5.3 wynika, że dla małych różnic między drogami przebytymi przez fale odbite i falę bezpośrednią, zmiany różnicy poziomów ΔL_S /w stosunku do warunków bezpogłosowych/ sięgają 10 dB. Wraz ze wzrostem różnicy dróg, zmiany parametru ΔL_S maleją. W normalnych warunkach rzadko przekraczają 3 dB.

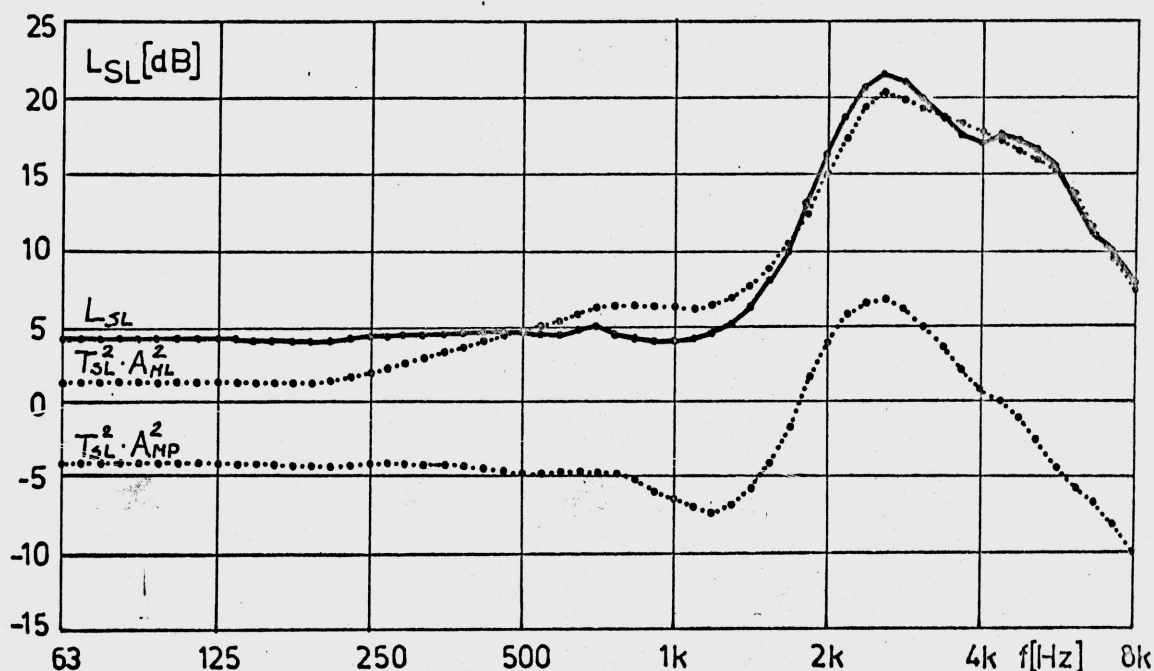
Z rys. 5.4 i 5.5 wynika, że na zmiany parametru ΔL_S bardzo istotny wpływ mają wskaźniki odbić od ścian pomieszczenia oraz kąty padania promieni fal odbitych na słuchacza. Przy dużych wartościach wskaźnika odbicia, zmiany różnicy poziomów sięgają 10 dB.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że w złych warunkach akustycznych /duże wskaźniki odbić od ścian, ustawienie źródła dźwięku bądź słuchacza blisko powierzchni odbijającej itp./, fale odbite mają znaczny wpływ na różnicę poziomów widm chwilo-

wych ΔL_S . Jeśli jednak słuchacz znajduje się w dobrych warunkach akustycznych, fale odbite nie mają istotnego wpływu na różnicę poziomów ΔL_S . Zgodnie z definicją, fale odbite nie mają wpływu na opóźnienie czasowe C_S .

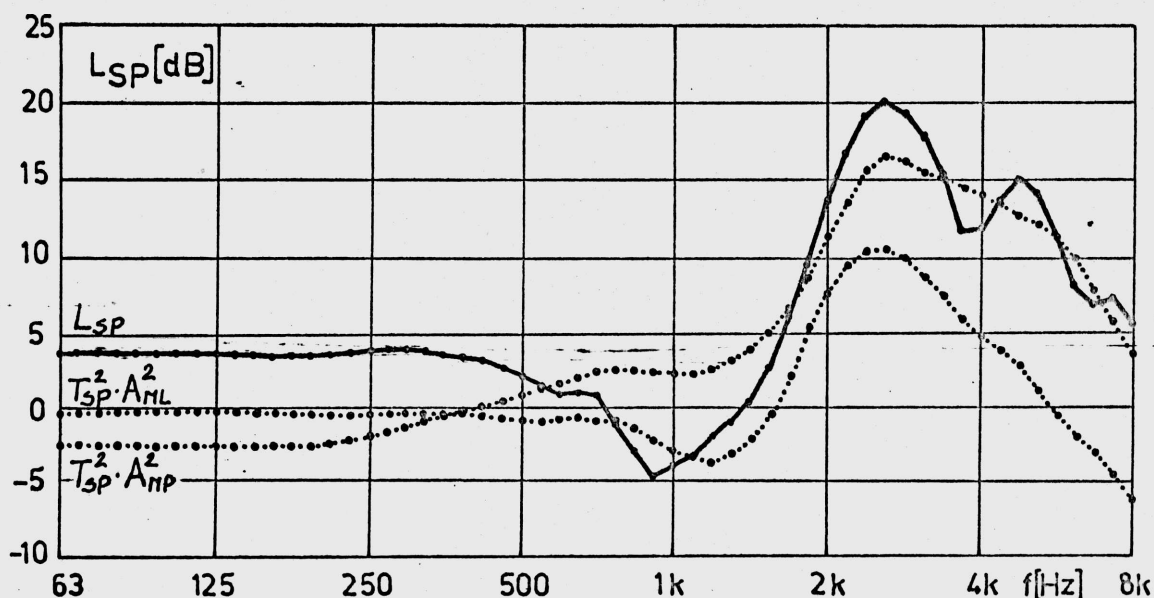
5.4. Analiza wyników obliczeń parametrów lokalizacyjnych dla odbioru za pośrednictwem dwukanałowej głośnikowej stereofonii natężeniowej

Parametry lokalizacyjne L_{SL} , L_{SP} i ΔL_S obliczono z chwilowych funkcji autokorelacji wyznaczonych na podstawie zależności podanych w rozdz. 3.5. Na rys. 5.6 i 5.7 przedstawiono zależności poziomów chwilowych widm mocy sygnałów lewego i prawego ucha od częstotliwości dla przypadku MK90, gdy źródło dźwięku położone jest względem mikrofonu pod kątem $\varphi = -30^\circ$. Dodatkowo na rys. 5.6 przedstawiono poziomy chwilowych widm mocy, jakie w lewym uchu słuchacza wytworzyłby osobno głośnik lewy $20\log(T_{SL}(f, -45^\circ) \cdot A_{ML}(-30^\circ))$ i prawy $20\log(T_{SL}(f, 45^\circ) \cdot A_{MP}(-30^\circ))$.



Rys. 5.6. Poziom chwilowego widma mocy L_{SL} dla przypadku MK90 dla kąta $\varphi = -30^\circ$ oraz poziomy widm jakie wytworzyłby każdy z głośników z osobna

Na rys. 5.7 przedstawiono poziom chwilowego widma mocy L_{SP} oraz poziomy widm, jakie w prawym uchu słuchacza wytworzyłyby osobno głośnik lewy $20\log(T_{SP}(f, -45^\circ) \cdot A_{ML}(-30^\circ))$ i prawy $20\log(T_{SP}(f, 45^\circ) \cdot A_{MP}(-30^\circ))$.



Rys. 5.7. Poziom chwilowego widma mocy L_{SP} dla przypadku MK90 dla kąta $\varphi = -30^\circ$ oraz poziomy widm jakie wytworzyłby każdy z głośników z osobna

W sytuacji, gdy do uszu słuchacza docierają sygnały emitowane przez lewy i prawy głośnik, sygnały $v_L(t)$ i $v_P(t)$ są superpozycją sygnałów wytwarzanych przez te głośniki. Składowe sygnałów o tych samych częstotliwościach podlegają interferencji. W zależności od przesunięcia fazowego $\Theta(f)$ pomiędzy składowymi sygnałów wytwarzanych przez lewy i prawy głośnik, dana składowa sygnału wypadkowego może mieć amplitudę większą lub mniejszą niż to wynika z sumy geometrycznej amplitud sygnałów składowych. Zależność przesunięcia fazowego $\Theta(f) = 2\pi f C_S^B(f, 45^\circ)$ od częstotliwości przedstawiono w tabeli 5.1. Jeśli przesunięcie fazowe $\Theta(f)$ pomiędzy składowymi sygnałów o częstotliwości f zawarte jest w granicach $-\pi/2 + k\pi < \Theta(f) < \pi/2 + k\pi$, $k = \dots, -1, 0, 1, \dots$, to amplituda wypadkowa będzie większa od sumy geometrycznej składowych. Odpowiada to pasmom I, III, V i VII zaznaczonym w tabeli 5.1.

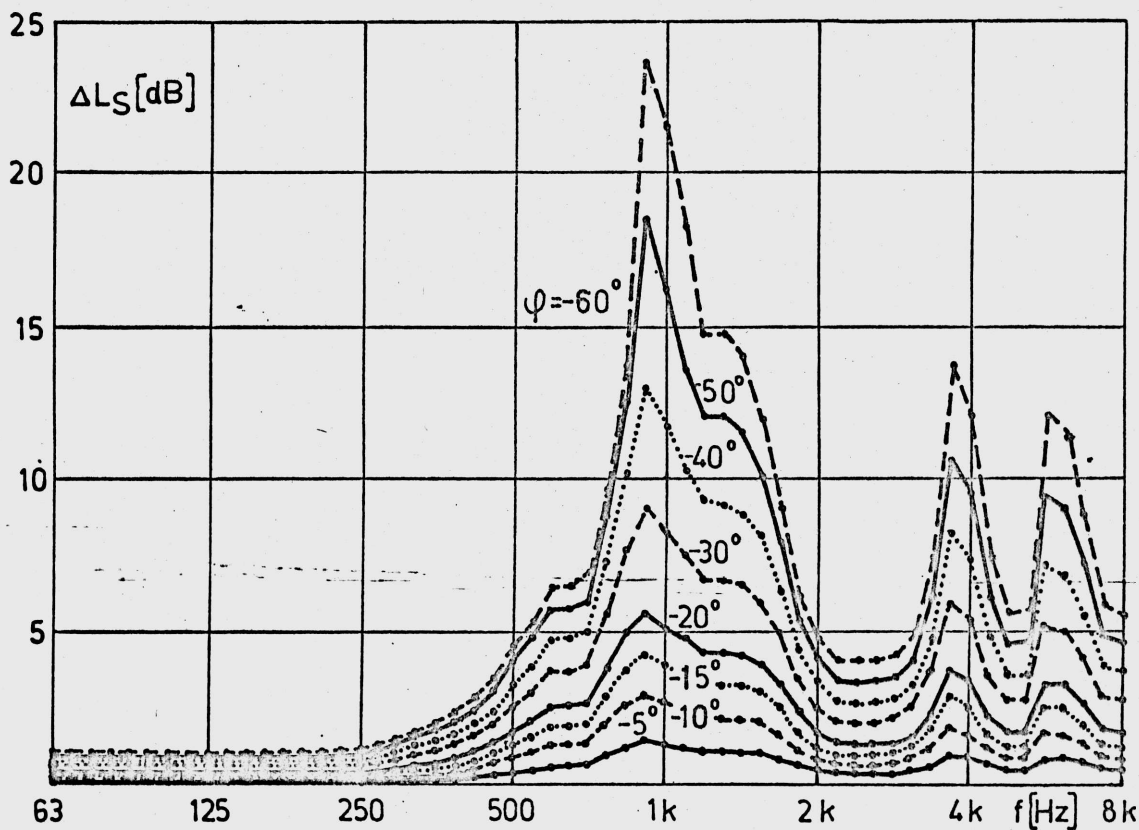
Tabela 5.1. Przesunięcia fazowe $\Theta(f)$ między sygnałami wytwarzanymi przez lewy i prawy głośnik dla przypadku, gdy kąt rozstawienia głośników wynosi 90°

nr pasma	I		II	III	IV	V	VI	VII
f[Hz]	63	422	1.88k	3.05k	4.37k	5.77k	7.23k	8k
C _s ^B [ms]	0.56	0.59	0.40	0.41	0.40	0.39	0.38	0.38
Θ[rd]	0.07π	0.5π	1.5π	2.5π	3.5π	4.5π	5.5π	6.08π

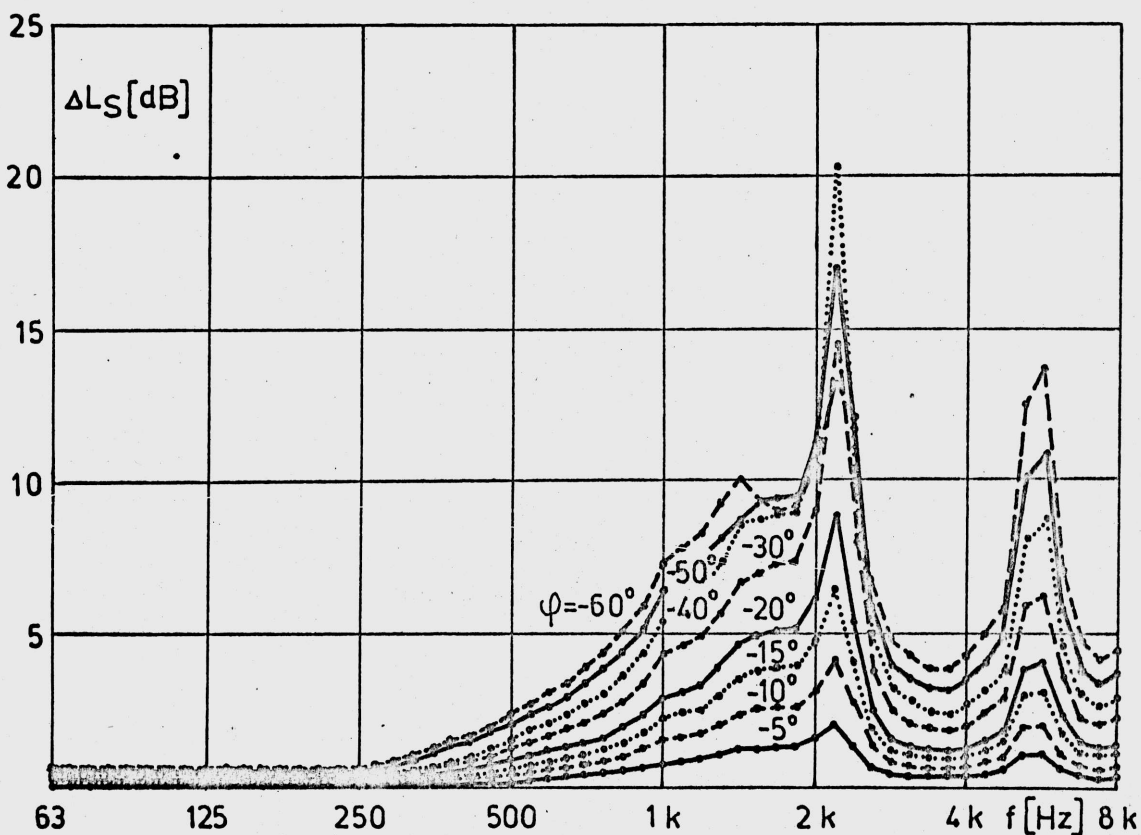
Jeśli natomiast przesunięcie fazowe wynosi $\pi/2+k\pi < \Theta(f) < 3\pi/2+k\pi$, $k = \dots, -1, 0, 1, \dots$, to amplituda wypadkowa będzie mniejsza. Zjawiska te są wyraźnie widoczne na rys. 5.6 i 5.7. Na rysunkach tych można również zauważyć, że ewentualne wzmocnienie lub osłabienie wzrasta z maleniem różnic między amplitudami sygnałów składowych. I tak, dla dużych częstotliwości, gdzie ze względu na zjawisko "zacieniania" składowe sygnału docierającego z dalszego głośnika posiadają mniejsze amplitudy, poziom wypadkowego chwilowego widma mocy kształtowany jest głównie przez głośnik bliższy. Dla małych częstotliwości, składowe pochodzące od obydwu głośników mają istotny wpływ na poziom wypadkowy.

Z rys. 5.6 i 5.7 wynika, że choć opisane zjawiska mają taki sam jakościowy charakter, ich przebieg ilościowy jest inny.

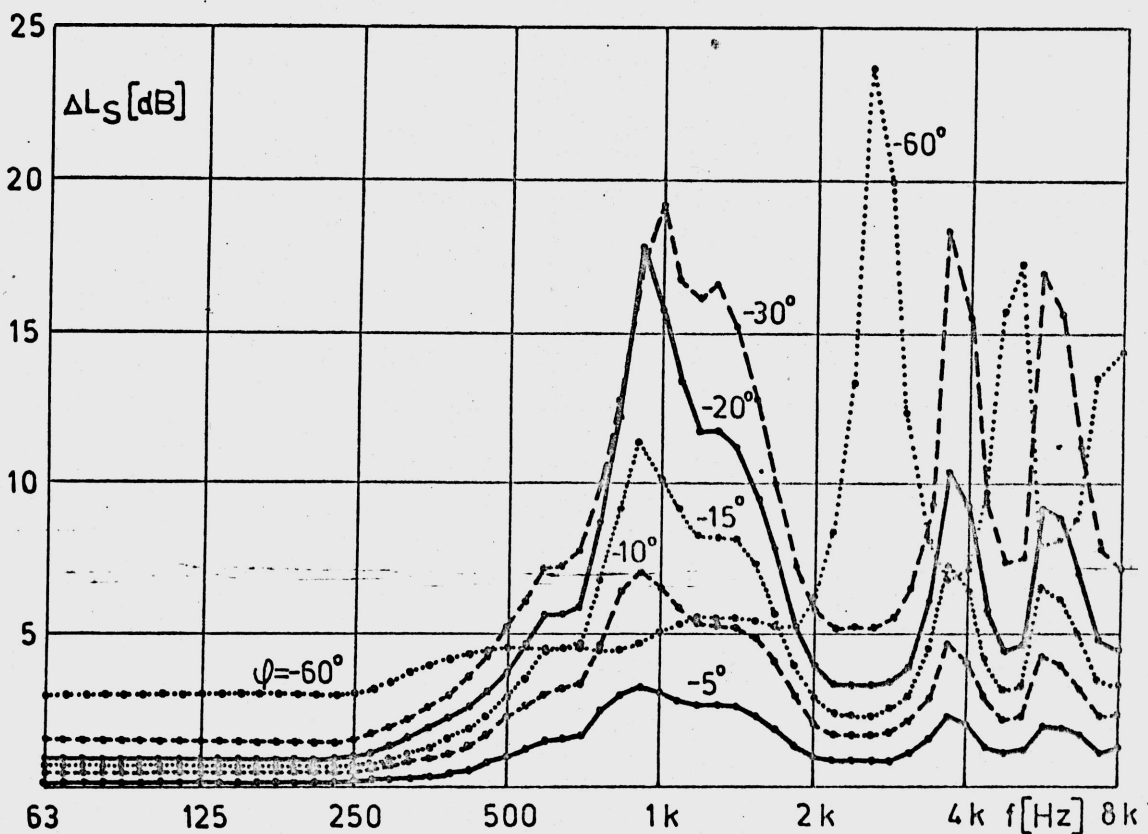
Na rys. 5.8 - 5.11 przedstawiono obliczone zależności różnic poziomów chwilowych widm mocy ΔL_S wytwarzanych przez system stereofoniczny od częstotliwości dla przypadków: MK90-rys.5.8, MK60 - rys. 5.9, MO90 - rys. 5.10 i MO60 - rys. 5.11. Na rysunkach tych parametrem jest kąt φ . Przedstawiono wykresy tylko dla ujemnych wartości kąta φ , bowiem przy założonej symetrii zewnętrznego systemu słuchowego, funkcja ΔL_S jest funkcją nieparzystą względem argumentu φ .



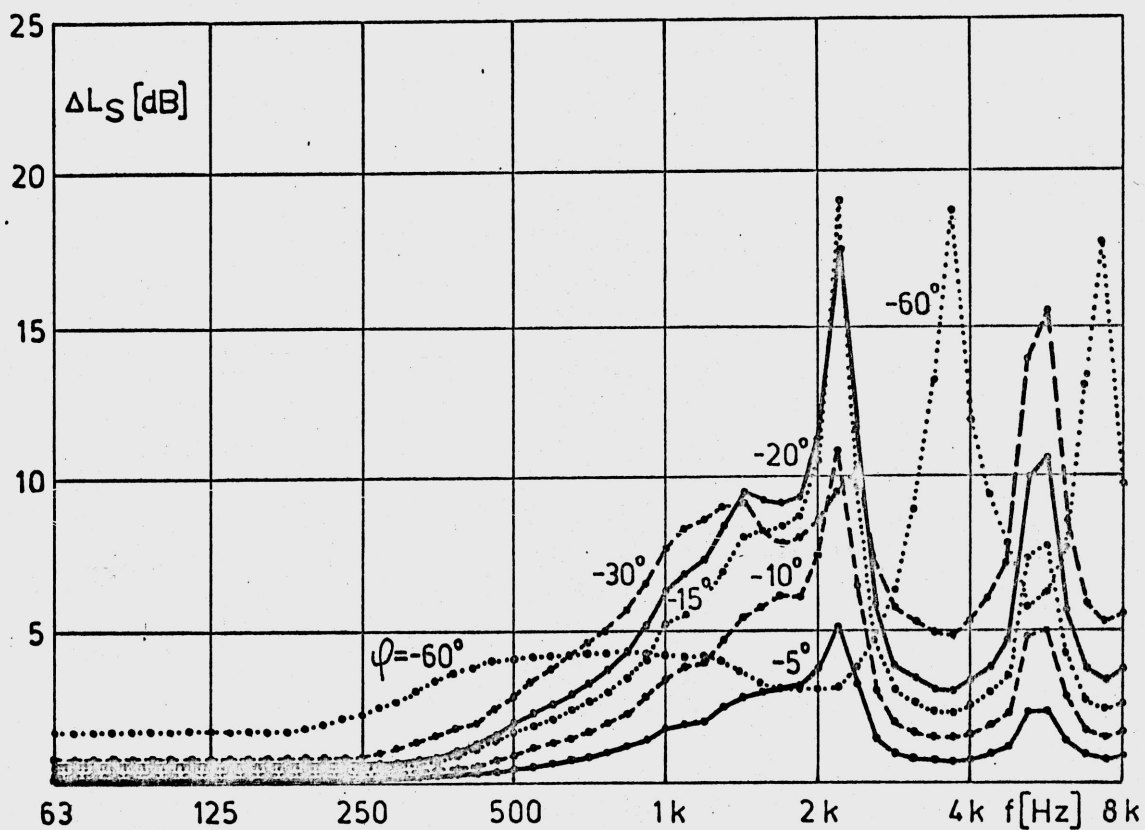
Rys. 5.8. Różnice poziomów chwilowych widm mocy ΔL_S dla przypadku MK90 dla różnych kątów φ jako parametr



Rys. 5.9. Różnice poziomów chwilowych widm mocy ΔL_S dla przypadku MK60 dla różnych kątów φ jako parametr



Rys. 5.10. Różnice poziomów chwilowych widm mocy ΔL_S dla przypadku M090 dla różnych kątów φ jako parametr



Rys. 5.11. Różnice poziomów chwilowych widm mocy ΔL_S dla przypadku M060 dla różnych kątów φ jako parametr

Z rys. 5.8 i 5.10 wynika, że w pasmach oznaczonych w tabeli 5.1 przez II, IV i VI, różnice poziomów chwilowych widm mocy ΔL_S przyjmują wartości zdecydowania większe niż w pasmach I, III, V i VII. Związane jest to z omawianą interferencją składowych sygnałów. Wyjątek stanowi przebieg ΔL_S z rys. 5.10 dla $\psi = -60^\circ$. Dla $\psi = -60^\circ$ skuteczność prawego mikrofonu wynosi $A_{MP} = -0.26$. Przesunięciu o π ulega więc faza sygnału emitowanego przez prawy głośnik, a tym samym przesunięcie fazowe $\Theta(f)$ między składowymi sygnałów wytwarzanych przez głośniki.

W tabeli 5.2 przedstawiono przesunięcia fazowe $\Theta(f)$ w pasmach częstotliwości dla przypadku, gdy kąt rozstawienia głośników wynosi 60° /MK60, MO60/.

Tabela 5.2. Przesunięcia fazowe $\Theta(f)$ między sygnałami wytwarzanymi przez lewy i prawy głośnik dla przypadku, gdy kąt rozstawienia głośników wynosi 60°

nr pasma	I		II	III	IV	V	
f[Hz]	63	746	2.67k	4.80k	6.73 k	8 k	
C_s^B [ms]	0.38	0.33	0.28	0.26	0.26	0.26	
Θ [rd]	0.04π	0.5π	1.5π	2.5π	3.5π	4.16π	

Na rys. 5.9 i 5.11 widoczne są podobne efekty lokalnego zwiększania się lub zmniejszania różnicy poziomów chwilowych widm mocy jak w przypadku rys. 5.8 i 5.10. Zmianie ulegają jednak wartości graniczne pasm częstotliwości. Wynika z innych wartości $C_s^B(f, 30^\circ)$, w porównaniu z wartościami $C_s^B(f, 45^\circ)$.

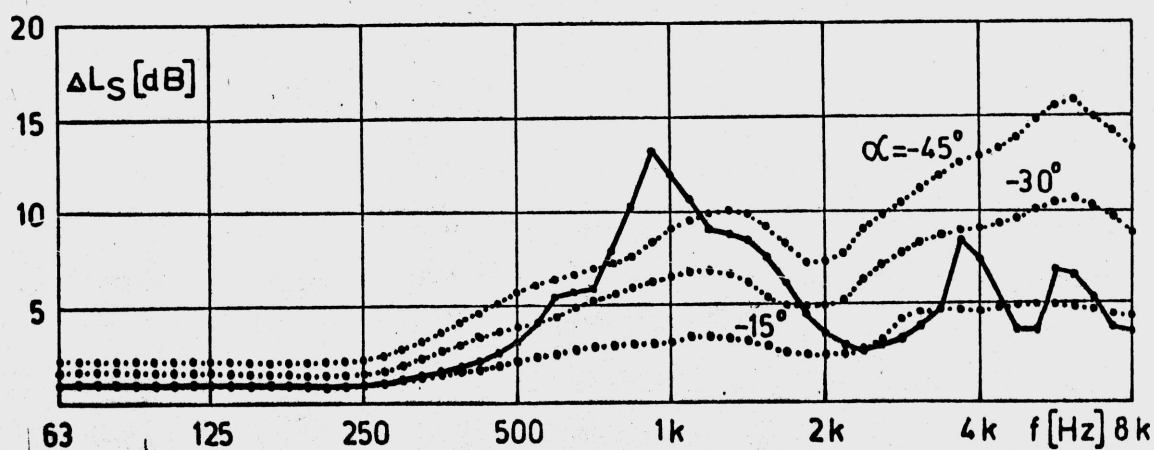
Za wyjątkiem przypadku MK90/kardioidalne charakterystyki mikrofonów i kąt rozstawienia głośników $2\mu = 90^\circ$ pozostałe roz-

patrywane przypadki, dla rozważanego zakresu zmienności kąta φ , nie wykazują jednoznacznego odwzorowania kąta φ położenia źródła dźwięku względem mikrofonu w różnice poziomów chwilowych widm mocy ΔL_S . Zdarza się, że ze wzrostem kąta φ maleje różnica poziomów ΔL_S . Jest to najbardziej widoczne na rys. 5.11, tzn. dla przypadku M060 /ósemkowe charakterystyki mikrofonów i kąt rozstawienia głośników $2\kappa = 60^\circ$ /.

Z porównania przypadków MK90 i MK60 z przypadkami M090 i M060 wynika, że mikrofon koïncydencyjny składający się z mikrofonów o ósemkowych charakterystykach kierunkowości daje większe różnice poziomów ΔL_S w zakresie małych wartości kąta φ .

Trzecim istotnym parametrem lokalizacyjnym jest opóźniecie czasowe C_S . Dla rozpatrywanych przypadków, ze względu na jednakową odległość głośników od słuchacza $/r_L = r_P/$ oraz na symetryczne rozmieszczenie głośników $/\alpha_L = -\alpha_P/$, opóźniecie czasowe C_S jest tożsamościowo równe zero.

Na rys. 5.12 przedstawiono różnice poziomów ΔL_S dla przypadku MK90, gdy źródło dźwięku położone jest pod kątem $\varphi = -40^\circ$. Dodatkowo na rysunku tym przedstawiono różnice poziomów ΔL_S wytwarzane przez źródło dźwięku w warunkach odbioru



Rys. 5.12. Różnice poziomów chwilowych widm mocy ΔL_S dla odbioru bezpośredniego w warunkach bezpogłosowych /linie punktowe/ i dla przypadku MK90 dla $\varphi = -40^\circ$ /linia ciągła/

bezpośredniego przy braku odbić od ścian pomieszczenia, dla kątów: $\alpha = -15^\circ$, $\alpha = -30^\circ$ i $\alpha = -45^\circ$. Z rys. 5.12 wynika, że różnice poziomów chwilowych widm mocy ΔL_S wytwarzane przez sygnały przekazywane torem stereofonicznym, mają zupełnie inną zależność od częstotliwości niż różnice poziomów dla odbioru bezpośredniego w warunkach bezpogłosowych.

W ramach korelacyjnej teorii sygnałów, na bazie chwilowych funkcji autokorelacji, w niniejszym rozdziale zdefiniowane zostały parametry lokalizacyjne sygnałów dochodzących do uszu słuchacza /patrz rozdz. 5.2/. Parametry sygnałów, na podstawie których słuchacz ocenia kierunek położenia źródła dźwięku, zwane parametrami lokalizacyjnymi, znane są z badań psychofizjologicznych [17, 21, 25, 26, 29, 53]. Podawane jednak w literaturze definicje tych parametrów są mało precyzyjne. Nie uwzględniają one złożoności widmowej struktury sygnałów bądź zależności parametrów lokalizacyjnych od czasu.

Z porównania wyników dla odbioru bezpośredniego w warunkach bezpogłosowych i pogłosowych wynika, że wpływ fal odbitych na różnicę poziomów ΔL_S jest mniejszy niż 3 dB, jeśli współczynniki odbić od ścian są małe a różnice w drogach przebytych przez falę bezpośrednią i fale odbite są duże. W przeciwnym przypadku, dla złych warunków akustycznych, wpływ fal odbitych jest znaczny, często powyżej 10 dB /patrz rozdz. 5.3.2/. Z obliczeń wynika również, że wykresy ΔL_S dla warunków pogłosowych "oplatają" wykres dla warunków bezpogłosowych. Na rys. 5.3 - 5.5 przedstawiono tylko przykładowe wyniki obliczeń, ale ilustrują one typowe wpływy parametrów opisujących fale odbite na różnice poziomów ΔL_S . Natomiast, zgodnie z definicją, opóźnienia czasowe C_S są jednakowe dla warunków bezpogłosowych jak i pogłosowych.

Poza tym z porównania wykresów różnicy poziomów ΔL_S wynika,

że dla systemu stereofonicznego, zależność różnicy poziomów od częstotliwości dla każdego z rozważanych wariantów systemu i dowolnego kąta położenia źródła dźwięku względem mikrofonu, ma zupełnie inny przebieg niż dla odbioru bezpośredniego. Dodatkowo opóźnienie czasowe C_S dla systemu teoretycznego jest tożsamościowo równe zero. Obydwie te istotne różnice mają poważny wpływ na wrażenie kierunku położenia źródła dźwięku /patrz rozdz. 7/.

Wyniki obliczeń przedstawione w rozdz. 5.3.1 pozwalają na zbudowanie kryterium oceny kierunku położenia źródła dźwięku /patrz rozdz. 6/, a wyniki przedstawione w rozdz. 5.4 są podstawą do oceny systemu stereofonicznego /patrz rozdz. 7/.

Rozdział 6

KRYTERIUM OCENY WRAŻENIA KIERUNKU POŁOŻENIA ŹRÓDŁA DŹWIĘKU

6.1. Wprowadzenie

Rozważania dotyczące przetwarzania przez system stereofoniczny sygnału emitowanego przez źródło dźwięku, w sygnały docierające do błon bębenkowych uszu słuchacza oraz analiza wpływu kąta horyzontalnego położenia źródła dźwięku względem mikrofonu koincydencyjnego na parametry lokalizacyjne, nie pozwalają na pełną ocenę jakości wytwarzanych przez system stereofoniczny wtórnych obrazów dźwiękowych. Na podstawie tych rozważań nie można bowiem stwierdzić:

- jakie wrażenie kierunku wywoła emitowany przez głośniki sygnał stereofoniczny, czyli jaka będzie decyzja słuchacza odnośnie kierunku położenia pozornego źródła dźwięku,
- czy wywołane wrażenie kierunku będzie naturalne.

Bez odpowiedzi na te pytania niemożliwa jest ocena systemu stereofonicznego. W związku z tym, w niniejszej pracy zaproponowano kryterium umożliwiające obiektywną ocenę efektu lokalizacji.

Badania psychofizjologiczne wykazały /patrz rozdz. 5.1/, że ocena kierunku położenia źródła dźwięku odbywa się na podstawie następujących parametrów sygnałów docierających do uszu słuchacza:

- jednousznych poziomów ciśnienia dźwięku,
- międzyusznej różnicy poziomów ciśnienia dźwięku,
- międzyusznego opóźnienia czasowego.

Ustalono /patrz rozdz. 5.2/, że powyższym parametrom, w ramach korelacyjnej teorii sygnałów, odpowiadają następujące parametry sygnałów:

- poziomy chwilowych widm mocy L_{SL} i L_{SP} ,
- różnica poziomów chwilowych widm mocy ΔL_S ,
- opóźnienie czasowe C_S .

Definicje tych wielkości podano w rozdz. 5.2. W oparciu o wymienione parametry lokalizacyjne zbudowane zostanie wspomniane kryterium oceny wrażenia kierunku.

6.2. Model decyzyjny

Jeśli układ źródło dźwięku - słuchacz znajduje się w warunkach bezpogłosowych, sygnały docierające do uszu słuchacza w sposób jednoznaczny określone są przez funkcje przejścia zewnętrznego systemu słuchowego człowieka odpowiadające danemu położeniu źródła dźwięku oraz przez sygnał emitowany przez to źródło /patrz rozdz. 2.2 i 2.3/. W takich warunkach parametry lokalizacyjne ΔL_S^B i C_S^B , będące estymatorami parametrów którymi posługuje się słuchacz, zależą przede wszystkim od funkcji przejścia zewnętrznego systemu słuchowego oraz od kierunku położenia źródła dźwięku. Natomiast parametry L_{SL}^B i L_{SP}^B przy lokalizacji spełniają funkcję pomocniczą i w związku z tym nie będą na razie brane pod uwagę.

Określenie kierunku położenia rzeczywistego źródła dźwięku w warunkach bezpogłosowych nie sprawia słuchaczowi żadnych trudności. Lokalizacja w takich warunkach jest naturalna. Przyjęto nazywać taką sytuację wzorcową.

Jeśli w warunkach wzorcowych źródło emituje sygnał o widmie skupionym wokół częstotliwości f_1 i umieszczone jest względem słuchacza pod kątem (α, β) , to sygnał ten wywołuje określone

opóźnienie czasowe $C_S(f_1) = C_S^B(f_1)$ i różnicę poziomów chwilowych widm mocy $\Delta L_S(f_1) = \Delta L_S^B(f_1)$. W warunkach wzorcowych istnieje zatem funkcja $g: R^3 \rightarrow R^2$, która danym wartościom f, α, β przyporządkowuje wartości ΔL_S^B i C_S^B . Z powodów podanych w rozdz. 2.3 pominięto wpływ odległości r źródła dźwięku od słuchacza na parametry lokalizacyjne.

Ponieważ wspomniane przyporządkowanie opisuje współzależność pięciu wielkości, sytuację tę można przedstawić w przestrzeni pięciowymiarowej $(\Delta L_S, C_S, f, \alpha, \beta)$. Dla danego słuchacza, w warunkach wzorcowych istnieje jednoznaczne odwzorowanie kątów α i β oraz częstotliwości f w opóźnienie czasowe C_S^B i różnicę poziomów ΔL_S^B . Dla ustalonych f, α i β współzależność pięciu wielkości reprezentowana jest przez punkt. Przyjęcie przez f, α i β wszystkich wartości z zakresu ich zmian spowoduje wygenerowanie pewnego zbioru $\mathcal{K}^*$. Zbiór ten w przestrzeni $(\Delta L_S, C_S, f, \alpha, \beta)$ reprezentowany będzie przez linię. Punkty leżące na tej linii opisywać będą wszystkie możliwe dla danego słuchacza współzależności pięciu wielkości opisujących lokalizację w warunkach wzorcowych. Zbiór $\mathcal{K}^*$ stanowi więc opis lokalizacji dla odbioru bezpośredniego w warunkach bezpogłosowych.

W wyniku doświadczeń wzrokowo - słuchowych w procesie uczenia się, słuchacz zapamiętuje współzależność pięciu wielkości opisujących lokalizację w warunkach wzorcowych. Gdy układ źródła dźwięku-słuchacz znajduje się w warunkach bezpogłosowych, a źródło dźwięku nie jest dla słuchacza widoczne, na podstawie częstotliwości f , opóźnienia czasowego C_S^B i różnicy poziomów ΔL_S^B , słuchacz jest w stanie określić kierunek położenia źródła dźwięku a więc określić kąty α i β . Ocena ta jest możliwa dzięki znajomości współzależności wielkości $\Delta L_S^B, C_S^B, f, \alpha, \beta$ opisanej przez zbiór $\mathcal{K}^*$. Można więc przyjąć, że zbiór $\mathcal{K}^*$ stanowi opis modelu decyzyjnego lokalizacji źródeł dźwięku.

Ze względu na indywidualne cechy budowy ciała, dla każdego ze słuchaczy występuje inna współzależność pięciu wielkości ΔL_S^B , C_S^B , f , α , β . Współzależność ta jest jednak niezmienna tak jak niezmiennie są kształty zewnętrznego systemu słuchowego. W procesie uczenia się każdy ze słuchaczy przyswaja sobie inne przyporządkowanie, tzn. tworzy własny zbiór $\mathcal{H}^*$. Te indywidualne przyporządkowania stanowią indywidualne modele decyzyjne. Z faktu posiadania przez każdego ze słuchaczy indywidualnych modeli decyzyjnych wynika, że należałoby dokonywać oceny efektu lokalizacji dla każdego ze słuchaczy z osobna. Należy się bowiem spodziewać, że oceny te będą się między sobą różnić. Tak szeroko pomyślana analiza właściwości systemów stereofonicznych jest jednak niewykonalna.

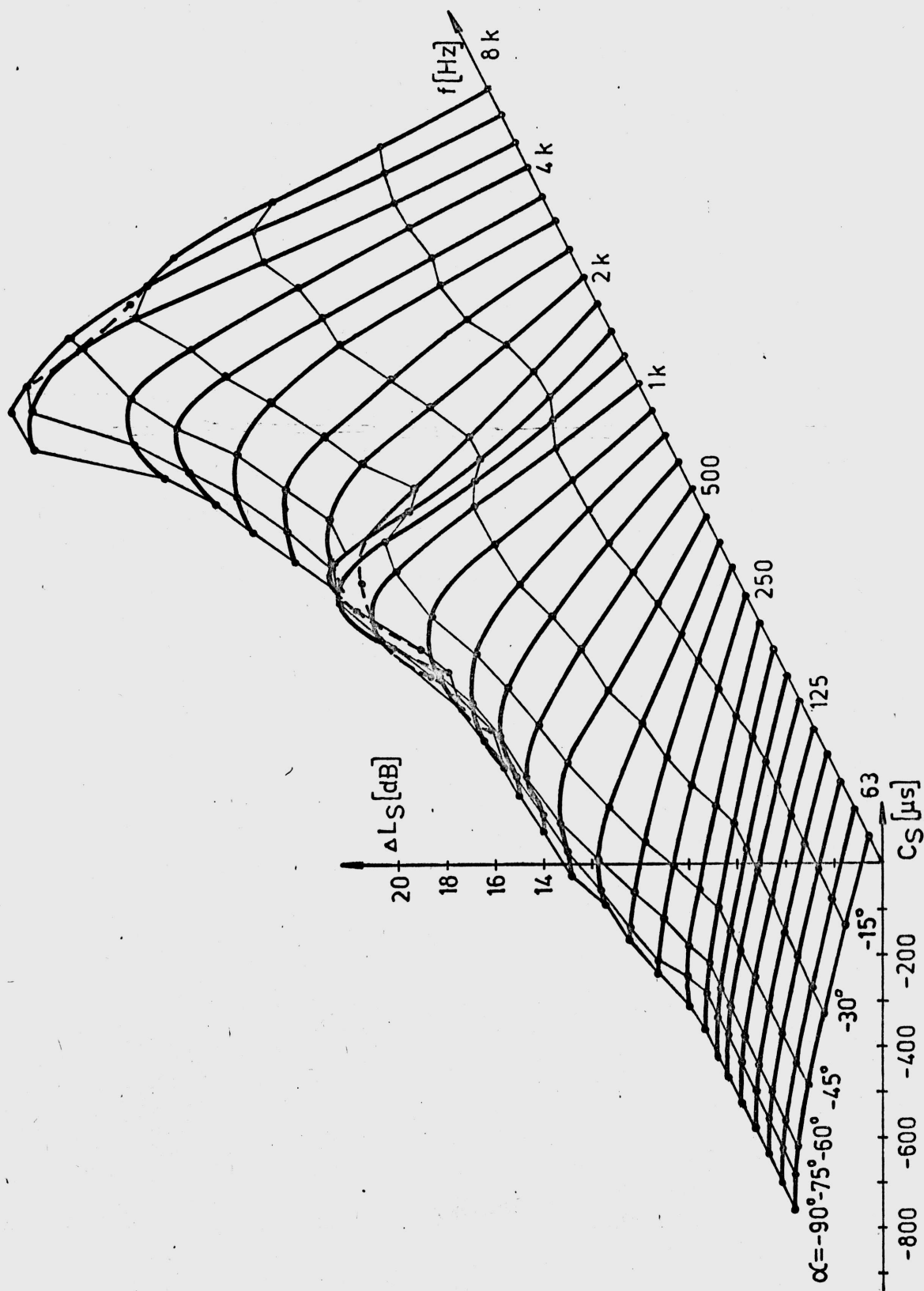
6.3. Uśredniony model decyzyjny

Dla celów takich jak ocena systemów stereofonicznych dla potrzeb producenta aparatury stereofonicznej, czy też budowa optymalnego systemu stereofonicznego, bardziej zasadne jest dokonanie oceny wrażenia kierunku położenia źródła dźwięku dla "słuchacza standardowego" reprezentującego właściwości organu słuchu grupy ludzi. Istnieje więc potrzeba zbudowania uśrednionego modelu decyzyjnego, uzyskanego w wyniku uśrednienia współzależności wielkości ΔL_S^B , C_S^B , f , α i β członków danej grupy. Wykonanie pomiarów indywidualnych charakterystyk organu słuchu, opracowanie metod ich uśredniania oraz w efekcie wyznaczenie modelu decyzyjnego "słuchacza standardowego" wymaga osobnych badań i zagadnienia te nie są w tej pracy rozwiązywane.

W związku z tym, w celu zbudowania modelu decyzyjnego "słuchacza standardowego" oparto się na przedstawionych na rys. 5.1 i rys. 5.2 zależnościach ΔL_S^B i C_S^B od częstotliwości i kąta

horyzontalnego α . Wielkości ΔL_S^B i C_S^B obliczone zostały na podstawie uśrednionych modułów funkcji przejścia zewnętrznego systemu słuchowego, podanych przez Shawa [56] /patrz dodatek B/. Dodatkowo, ze względu na brak wystarczających danych dotyczących wpływu kąta wertykalnego β na ΔL_S^B i C_S^B , istnieje konieczność ograniczenia rozważań do płaszczyzny horyzontalnej, czyli do przypadku $\beta = 0^\circ$. Ograniczenie to sprowadza model decyzyjny do czterech wymiarów: ΔL_S , C_S , f i α . Ze względów praktycznych nie ma to istotnego znaczenia, gdyż lokalizacja pozornych źródeł dźwięku w dwukanałowej stereofonii głośnikowej powinna ograniczać się do płaszczyzny horyzontalnej. Podniesienie pozornego źródła dźwięku, co jest niekiedy obserwowane, z tego punktu widzenia traktowane będzie jako niezgodność uzyskanego efektu z efektem pożądanym.

Zbiór określony w przestrzeni czterowymiarowej oznaczono przez $\mathcal{H}$. W przestrzeni czterowymiarowej zbiór $\mathcal{H}$ reprezentowany jest przez linię. W celu graficznego przedstawienia zbioru $\mathcal{H}$, wykonano przekroje tego zbioru dla $f = f_k$. Przekroje te oznaczono przez $\mathcal{H}_k$. Przekroje $\mathcal{H}_k$ można przedstawić w przestrzeni trójwymiarowej $(\Delta L_S, C_S, \alpha)$, w której reprezentowane są przez linie. Następnie wykonano rzuty prostokątne przekrojów $\mathcal{H}_k$ na płaszczyznę $(\Delta L_S, C_S)$. Na rys. 6.1 przedstawiono rodzinę rzutów przekrojów $\mathcal{H}_k$. Przekroje wykonano co $1/4$ oktawy w zakresie od 63 Hz do 8 kHz. Rys. 6.1 ilustruje część zbioru $\mathcal{H}$ z zakresu zmienności kąta α od $\alpha = -90^\circ$ do $\alpha = 0^\circ$. Wielkości ΔL_S^B i C_S^B są bowiem nieparzystymi funkcjami kąta α . W celu uczynienia rysunku bardziej czytelnym, punkty rzutów zbiorów $\mathcal{H}_k$ odpowiadające danemu kątowi α połączono cienką linią.



Rys. 6.1. Rodzina rzutów przekrojów $\mathcal{H}_k$ zbioru $\mathcal{H}$

6.4. Definicja odległości d_k oraz kąta α_k

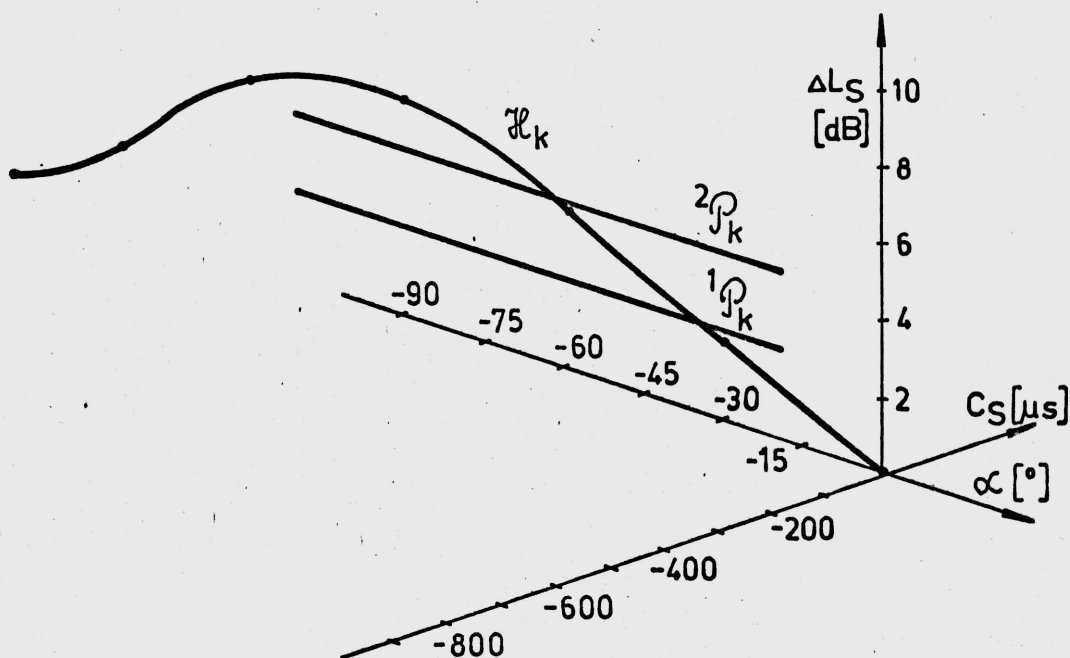
Wprowadzony w rozdz. 6.3 zbiór $\mathcal{H}$ opisuje współzależność parametrów ΔL_S i C_S , częstotliwości i kąta α dla odbioru bezpośredniego w warunkach bezpogłosowych. Lokalizacja w takich warunkach jest bezbłędna i naturalna. Najczęściej zdarza się jednak, że słuchacz określa położenie źródła dźwięku w pomieszczeniu w którym występują odbicia od ścian. Odbicia te powodują zmianę /w stosunku do warunków bezpogłosowych/ różnicy poziomów ΔL_S /patrz rozdz. 2.5 i 5.3.2/. Nie ulega natomiast zmianie opóźnienie czasowe C_S , gdyż jest ono zdeterminowane przez falę bezpośrednią. Mimo, że współzależność wielkości ΔL_S , C_S , f i α jest inna niż w warunkach wzorcowych i dodatkowo zmienia się wraz ze zmianą warunków akustycznych, lokalizacja źródła dźwięku jest przez słuchacza dokonywana.

Gdy jednak odbicia od ścian w istotny sposób zmieniają różnicę poziomów ΔL_S , a słuchacz nie widzi źródła dźwięku, może on mieć kłopoty z określeniem kierunku położenia źródła dźwięku i lokalizacja może być fałszywa /Miszczak [36]/. W przypadku gdy odbicia od ścian nie mają dużego wpływu na ΔL_S , określenie kierunku położenia źródła dźwięku nie jest dla słuchacza trudne i lokalizacja jest poprawna.

Podobne problemy mogą wystąpić przy odbiorze sygnałów przekazywanych za pośrednictwem systemu stereofonicznego. W takiej sytuacji słuchacz nie widzi źródła dźwięku. Pojawia się źródło pozorne. Słuchacz musi określić kierunek położenia źródła dźwięku na podstawie parametrów sygnałów docierających do jego uszu, to znaczy na podstawie częstotliwości, różnicy poziomów ΔL_S i opóźnienia czasowego C_S .

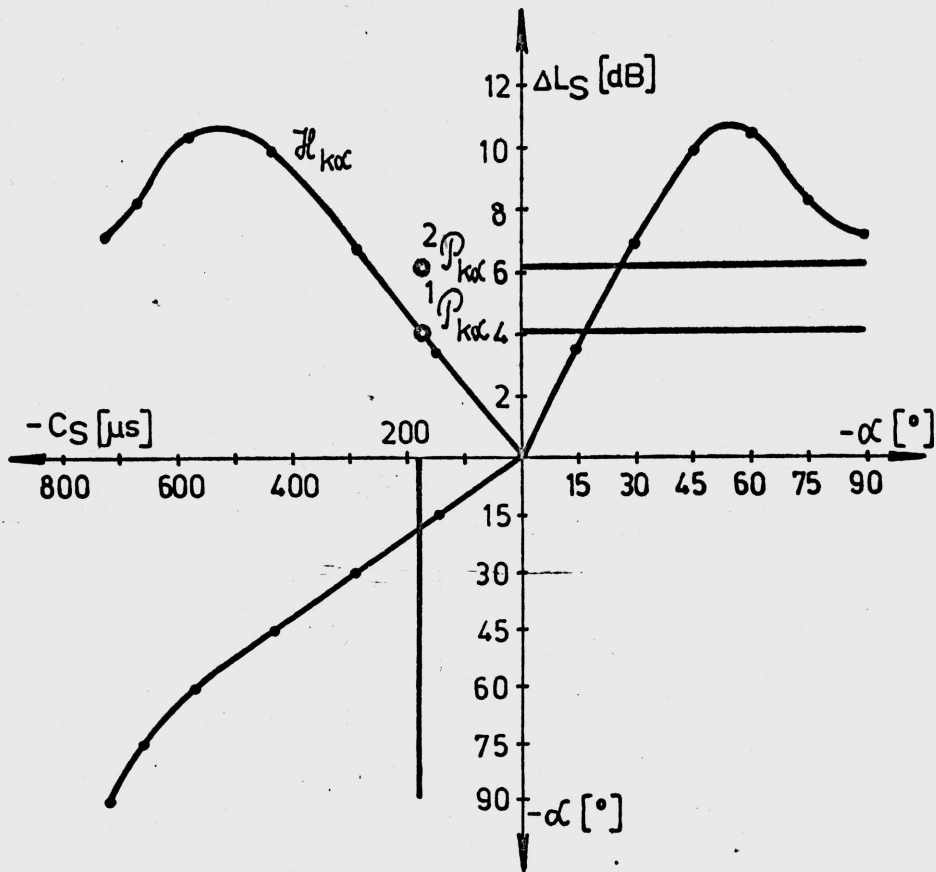
W celu zobrazowania różnych możliwych współzależności wielkości ΔL_S , C_S , f i α w warunkach pogłosowych, rozważono przy-

kład. Przyjęto, że źródło dźwięku umieszczone względem słuchacza pod kątem $\alpha_i / \beta = 0^\circ$ emituje sygnał o chwilowym widmie mocy $S_{xi}(f)$. Następnie zajęto się pasmem widma o szerokości df i częstotliwości środkowej f_k . Pasmo to, w warunkach bezpogłosowych, w uszach słuchacza wytworzy ΔL_{Sk} i ${}^1C_{Sk}$ - przypadek A, zaś w przypadku występowania odbić od ścian, np. ΔL_{Sk} i ${}^1C_{Sk}$ - przypadek B. Ponieważ rozpatrywane jest wąskie pasmo częstotliwości, dla przeanalizowania tych przypadków wystarczający jest przekrój $\mathcal{H}_k$ zbioru $\mathcal{H}$. W przestrzeni trójwymiarowej sytuacje A i B opisują proste równoległe $(\Delta L_{Sk}, {}^1C_{Sk}, \alpha)$ i $(\Delta L_{Sk}, {}^1C_{Sk}, \alpha)$ nazywane dalej ${}^1\mathcal{P}_k$ i ${}^2\mathcal{P}_k$ odpowiednio. Przekrój $\mathcal{H}_k$ oraz proste ${}^1\mathcal{P}_k$ i ${}^2\mathcal{P}_k$ przedstawiono na rys. 6.2.



Rys. 6.2. Przekrój $\mathcal{H}_k$ oraz proste ${}^1\mathcal{P}_k$ i ${}^2\mathcal{P}_k$

Na rys. 6.3 przedstawiono rzuty tych linii na płaszczyzny $(\Delta L_S, C_S)$, $(\Delta L_S, \alpha)$ i (C_S, α) .



Rys. 6.3. Rzuty przekroju $\mathcal{H}_k$ oraz prostych 1P_k i 2P_k na płaszczyzny $(\Delta L_S, C_S)$, $(\Delta L_S, \alpha)$ i (C_S, α)

Prosta 1P_k , odpowiadająca warunkom bezpogłosowym, przecina przekrój $\mathcal{H}_k$ w punkcie o współrzędnych $({}^1L_{Sk}, {}^1C_{Sk}, \alpha_1)$, przy czym spełniona zostanie równość $\alpha_1 = \alpha_i$. Natomiast prosta 2P_k , w ogólnym przypadku, nie będzie miała punktu wspólnego z przekrojem $\mathcal{H}_k$.

Do oceny przypadków, gdy prosta opisująca daną sytuację nie ma punktów wspólnych ze zbiorem $\mathcal{H}_k$ wprowadzono pojęcie odległości. Pojęcie odległości umożliwi rozpatrywanie wszystkich możliwych współzależności wielkości ΔL_S , C_S , f i α . Do prowadzonych rozważań zastosowane zostanie pojęcie odległości euklidesowej /Kudrewicz [27], Rolewicz [49]/.

Odległością d_k^* prostej mP_k od przekroju $\mathcal{H}_k$ zbioru $\mathcal{H}$

nazwano odległość rzutu prostokątnego tej prostej na płaszczyznę $(\Delta L_S, C_S)$ od rzutu prostokątnego przekroju $\mathcal{H}_k$ na tę samą płaszczyznę, przy czym różnice poziomów ΔL_S i opóźnienia czasowe C_S poddano normalizacji.

Rzut prostej ${}^m\mathcal{P}_k$ na płaszczyznę $(\Delta L_S, C_S)$ jest punktem. Niech ${}^m\mathcal{P}_{k\alpha}$ oznacza ten punkt. Rzut przekroju $\mathcal{H}_k$ na płaszczyznę $(\Delta L_S, C_S)$ jest linią. Linię tę oznaczono przez $\mathcal{H}_{k\alpha}$. Dla danej częstotliwości f_k , wielkości ΔL_{Sk}^B i C_{Sk}^B są funkcjami kąta α , tak więc współrzędne punktów leżących na linii $\mathcal{H}_{k\alpha}$ zależą od kąta α .

Różnica poziomów ΔL_S i opóźnienie czasowe C_S są różnymi wielkościami fizycznymi. W celu określenia odległości d_k^* współrzędne punktów leżących na linii $\mathcal{H}_{k\alpha}$ i punktu ${}^m\mathcal{P}_{k\alpha}$ należy sprowadzić do postaci bezwymiarowych, czyli niezbędna jest normalizacja. Przyjęto, że wartościami normującymi będą:

- dla różnicy poziomów ΔL_S - wartość M_{Lk} będąca maksymalną wartością różnicy poziomów jaką przyjmuje przekrój $\mathcal{H}_k$ w zakresie od $\alpha = 0^\circ$ do $\alpha = -90^\circ$,
- dla opóźnienia czasowego C_S - wartość M_{Ck} będąca maksymalną wartością opóźnienia czasowego jakie przekrój $\mathcal{H}_k$ przyjmuje w zakresie od $\alpha = 0^\circ$ do $\alpha = -90^\circ$.

Po unormowaniu, współrzędne punktu ${}^m\mathcal{P}_{k\alpha} - (\eta_1, \eta_2)$ są następujące:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \Delta L_{Sk} / M_{Lk} \\ \eta_2 &= C_{Sk} / M_{Ck} \end{aligned} \quad \left| \quad /6.1/ \right.$$

Natomiast współrzędne punktów leżących na linii $\mathcal{H}_{k\alpha} - (\lambda_1, \lambda_2)$ są następującymi funkcjami kąta α :

$$\begin{aligned} \lambda_1(\alpha) &= \Delta L_{Sk}^B(\alpha) / M_{Lk} \\ \lambda_2(\alpha) &= C_{Sk}^B(\alpha) / M_{Ck} \end{aligned} \quad \left| \quad /6.2/ \right.$$

Mając określone unormowane współrzędne punktu ${}^m\mathcal{P}_{k\alpha}$ oraz współrzędne punktów leżących na linii $\mathcal{H}_{k\alpha}$, odległość d_k można wyznaczyć z zależności:

$$d_k^* = \min \{g_k^*(\alpha)\} \quad /6.3/$$

gdzie:

$$g_k^*(\alpha) = \sqrt{[\eta_1 - \lambda_1(\alpha)]^2 + [\eta_2 - \lambda_2(\alpha)]^2} \quad /6.4/$$

Należy zwrócić uwagę, że zgodnie z definicją d_k^* jest liczbą przyporządkowaną danej częstotliwości f_k .

Odległość prostej ${}^m\mathcal{P}_k$ od przekroju $\mathcal{H}_k$ pomyślana jest jako miara przydatna przy określaniu kierunku położenia źródła dźwięku. Miara taka musi uwzględniać właściwości organu słuchu człowieka, a w szczególności te właściwości które powodują, że dla małych częstotliwości decydujący wpływ na określenie kierunku położenia źródła dźwięku ma opóźnienie czasowe C_S , a dla dużych częstotliwości - różnica poziomów ΔL_S /Miszczak [35], Żyszkowski [68]/. Niezbędne jest więc wprowadzenie odległości ważonej.

Zdefiniowaną zależnościami /6.3/ i /6.4/ odległość można zmodyfikować do postaci:

$$d_k = \min \{g_k(\alpha)\} = \min \left\{ \sqrt{W_{Lk}(\eta_1 - \lambda_1)^2 + W_{Ck}(\eta_2 - \lambda_2)^2} \right\} \quad /6.5/$$

gdzie: W_{Lk} - współczynnik wagowy dla różnicy poziomów ΔL_S dla częstotliwości f_k , W_{Ck} - współczynnik wagowy dla opóźnienia czasowego C_S dla częstotliwości f_k .

Jak wynika z badań psychofizjologicznych [35, 68], współczynniki wagowe powinny być funkcjami częstotliwości. Funkcje te muszą uwzględniać mniejsze znaczenie różnicy poziomów ΔL_S , a większe znaczenie opóźnienia czasowego C_S przy lokalizacji źródła dźwięku emitującego sygnał małowartościowy i odwrotnie. Dla średnich częstotliwości przy lokalizacji źródeł dźwięku

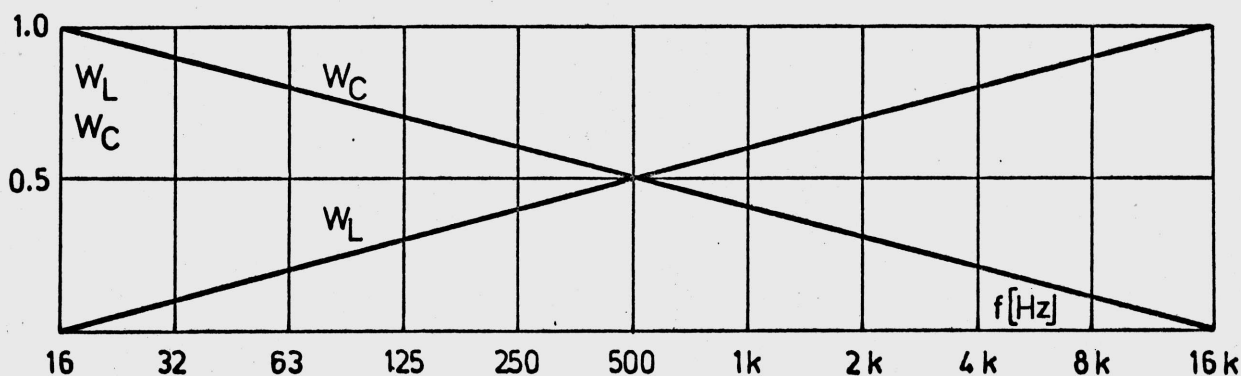
istotne znaczenie ma zarówno różnica poziomów ΔL_S , jak i opóźnienie czasowe C_S /Hanning [25, 26]/. Dotychczas nie są dokładnie znane zależności opisanych wyżej właściwości organu słuchu człowieka od częstotliwości. Do dalszych rozważań przyjęto następującą zależność współczynników wagowych od częstotliwości:

$$W_{Lk} = 0.1 \log_2 f_k - 0.4$$

$$W_{Ck} = -0.1 \log_2 f_k + 1.4$$

/6.6/

Wykresy przyjętych zależności współczynników wagowych od częstotliwości przedstawiono na rys. 6.4.



Rys. 6.4. Zależności współczynników wagowych W_{Lk} i W_{Ck} od częstotliwości

Podstawiając /6.1/, /6.2/ i /6.6/ do /6.5/ otrzymano:

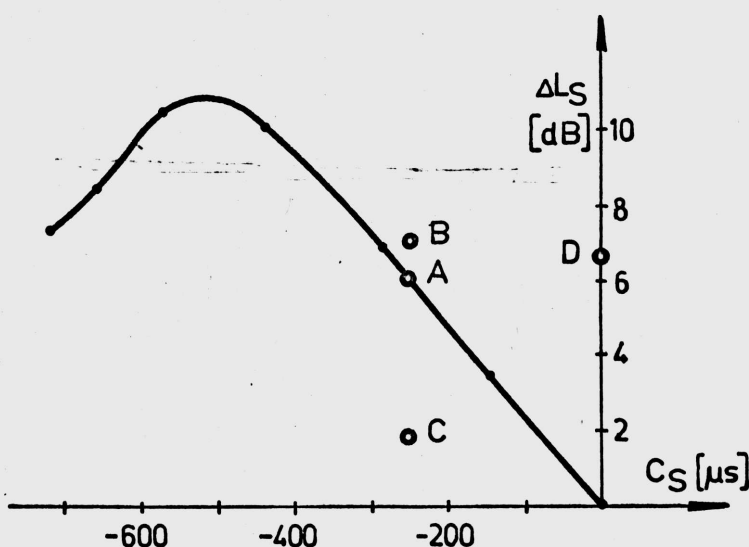
$$d_k = \min \left\{ \sqrt{(0.1 \log_2 f_k - 0.4) \left[\frac{m_{Lsk} - \Delta_{Lsk}^B}{M_{Lk}} \right]^2 + (-0.1 \log_2 f_k + 1.4) \left[\frac{m_{Csk} - C_{sk}^B}{M_{Ck}} \right]^2} \right\} \quad /6.7/$$

Wprowadzono również wielkość α_k . Niech α_k oznacza kąt dla którego zachodzi d_k , czyli α_k jest taką wartością kąta α dla której funkcja $\varphi_k(\alpha)$ osiąga minimum. Wielkość α_k jest funkcją częstotliwości, tak jak funkcją częstotliwości jest wielkość d_k .

Fizyczne znaczenia odległości d_k i kąta α_k omówione jest w rozdz. 6.5.

6.5. Interpretacja odległości d_k i kąta α_k

Tytułem przykładu, na rys. 6.5 przedstawiono rzut przekroju $\mathcal{H}_k$ zbioru $\mathcal{H}$ oraz rzuty różnych prostych ${}^m\mathcal{P}_k$, oznaczone punktami A, B, C i D, na płaszczyznę $(\Delta L_S, C_S)$. Rys. 6.5 przedstawia autentyczny przekrój zbioru $\mathcal{H}$ określonego w rozdz. 6.3 dla $f_k = 1200$ Hz.



Rys. 6.5. Rzut przekroju $\mathcal{H}_k$ oraz prostych ${}^m\mathcal{P}_k$ na płaszczyznę $(\Delta L_S, C_S)$. $f_k = 1200$ Hz

Dla sytuacji A, prosta ${}^m\mathcal{P}_k$ ma punkt wspólny z przekrojem $\mathcal{H}_k$. Odległość d_k dla tego przypadku jest równa zero. α_k wynosi około -27° . Sytuacja taka może być wytworzona podczas odbioru bezpośredniego w warunkach bezpogłosowych. Zachodzi wtedy równość $\alpha_k = \alpha_i$ / α_i oznacza kąt pod jakim faktycznie znajduje się źródło dźwięku/. Sytuacja A może być również wytworzona przez sygnał przekazywany torem stereofonicznym. Znajdzie wtedy pełna analogia do warunków wzorcowych i określenie kierunku położenia źródła dźwięku nie będzie trudne. Słuchacz oceni, że pozorne źródło dźwięku umieszczone jest pod kątem α_k . Taki efekt stereofoniczny będzie efektem naturalnym.

Dla sytuacji B, prosta ${}^m\mathcal{P}_k$ nie ma punktu wspólnego z

przekrojem $\mathcal{H}_k$. Odległość d_k jest jednak mała $/d_k < d_g$, d_g - pewna odległość graniczna/. Kąt α_k wynosi około -29° . Sytuacja taka jak B może być wytworzona podczas odbioru bezpośredniego w pomieszczeniu o dobrych warunkach akustycznych. W takich warunkach, na skutek odbić od ścian pomieszczenia, zmianom /w stosunku do warunków bezpogłosowych/ może ulec różnica poziomów ΔL_S . Zmiana ta jednak nie będzie duża. Nie ulegnie natomiast zmianie opóźnienie czasowe C_S . Z badań psychofizjologicznych wynika, że lokalizacja w takich warunkach jest również dobra /Miszczak [36]/. Kąt pod jakim słuchacz umiejscowi źródło dźwięku będzie bliski kątowi α_i .

Sytuacja B może być również wytworzona przez sygnał przekazywany torem stereofonicznym. Wtedy słuchacz również nie będzie miał trudności z określeniem kierunku położenia pozornego źródła dźwięku.

Dla sytuacji C odległość d_k jest duża $/d_k > d_g$ /. Kąt α_k wynosi około -15° . Sytuacja C może być wytworzona podczas odbioru bezpośredniego w pomieszczeniu o złych warunkach akustycznych. Lokalizacja w takich warunkach jest utrudniona lub czasem niemożliwa, a słuchacz może źle ocenić położenie źródła.

Dla sytuacji C odległość d_k jest również duża $/d_k > d_g$ /. Kąt α_k wynosi około -20° . Taka sytuacja może wystąpić w przypadku odbioru za pośrednictwem systemu stereofonicznego /patrz rozdz. 5/. Ponieważ odległość d_k /podobnie jak dla sytuacji C/ jest duża, słuchacz będzie miał trudności z określeniem kierunku położenia źródła dźwięku. Dla słuchacza jest bowiem obojętne, czy dane parametry lokalizacyjne ΔL_{Sk} i C_{Sk} wytworzone zostały przez sygnały dochodzące do uszu słuchacza wprost ze źródła, czy poprzez system stereofoniczny.

Trudności w określeniu kierunku położenia źródła dźwięku

mogą być spowodowane przez nienaturalne współzależności parametrów sygnałów docierających do uszu słuchacza, tzn. częstotliwości, różnicy poziomów ΔL_S i opóźnienia czasowego C_S . Może to być nienaturalnie duża wartość ΔL_S dla danej częstotliwości, np. dla $f_k = 2$ kHz - $\Delta L_{Sk} > 20$ dB, co w warunkach wzorcowych nie zdarza się dla żadnego kąta α . Może to być zerowe opóźnienie czasowe C_{Sk} i duże ΔL_{Sk} dla średnich częstotliwości. Zerowe opóźnienie czasowe wskazuje bowiem na kąt $\alpha = 0$, natomiast ΔL_{Sk} na duży ujemny kąt α . Sprzeczność tych informacji powodować może niemożność podjęcia decyzji, gdzie faktycznie znajduje się źródło dźwięku. Wrażenie kierunku będzie nienaturalne.

Interpretacja nadana w niniejszym rozdziale wielkościom d_k i α_k zgodna jest z badaniami przedstawianymi w wielu pracach [7, 12, 21, 22, 24, 25, 36, 61, 68].

Za pomocą odległości d_k i kąta α_k można określić, jaka będzie decyzja słuchacza odnośnie położenia rzeczywistego lub pozornego źródła dźwięku. Z drugiej strony wielkości te opisują współzależność danych wartości f , ΔL_{Sk} i C_{Sk} ze zbiorem $\mathcal{L}_k$. Odległość d_k i kąt α_k mogą więc być obiektywnymi miarami subiektywnego wrażenia kierunku położenia źródła dźwięku.

Odległość d_k porównywana była z pewną odległością graniczną d_g . Odległość graniczna d_g spełniała rolę wartości rozgraniczającej między lokalizacją naturalną i nienaturalną. Granica ta jest oczywiście granicą umowną, gdyż często niemożliwy jest osąd, czy dla określonej częstotliwości dana różnica poziomów i opóźnienie czasowe zapewniają jeszcze lokalizację naturalną, czy już nienaturalną. Na podstawie przeprowadzonej dyskusji można jednak stwierdzić, że im odległość d_k będzie mniejsza, tym lokalizacja będzie bardziej naturalna. Posługiwanie się odległością d_g jest konieczne, gdyż bez takiej granicy niemożliwa jest ocena jakości efektu lokalizacji źródła dźwięku.

Powstaje więc pytanie jaka jest wartość tej granicznej odległości d_g ? Odpowiedź na to pytanie wymaga osobnych badań psychofizjologicznych, gdyż w literaturze brak jest tego typu danych.

Przedstawione wyżej rozważania dotyczą pasma widma o częstotliwości środkowej f_k , sygnału emitowanego przez źródło dźwięku. Ponieważ najczęściej źródło emituje sygnał o złożonej strukturze widmowej, w celu określenia jaka będzie decyzja słuchacza odnośnie położenia źródła dźwięku oraz czy lokalizacja będzie naturalna czy też nie, niezbędne jest określenie d_k i α_k dla wszystkich składowych widma emitowanego przez źródło.

Jeśli rozpatrywać sytuację odbioru bezpośredniego w warunkach bezpogłosowych, to dla wszystkich składowych widma spełniona będzie równość $\alpha_k = \alpha_i$, czyli wszystkie składowe sygnału wskazywać będą kierunek, gdzie faktycznie położone jest źródło dźwięku. Odległość d_k dla wszystkich częstotliwości będzie równa zero.

Gdy oceniana będzie lokalizacja rzeczywistego źródła dźwięku w warunkach pogłosowych, najczęściej odległości d_k nie będą zerowe, a tym samym kąty α_k różnić się będą od kąta α_i . Jeśli pomieszczenie będzie miało dobre warunki akustyczne, odległości d_k będą małe a kąty α_k będą bliskie kątowi α_i . Wraz z pogarszaniem się warunków akustycznych, d_k będzie rosło a rozrzuty α_k wokół α_i będą coraz większe.

W przypadku określania kierunku położenia źródła pozornego, możliwe są bardzo różne sytuacje. Zależać to będzie przede wszystkim od sposobu przekazywania sygnału od źródła dźwięku do uszu słuchacza, czyli od właściwości systemu stereofonicznego. Dlatego też, posługiwanie się w tym przypadku wielkościami d_k i α_k może być bardzo przydatnym sposobem oceny efektu lokalizacji po-

zornego źródła dźwięku.

Powiązanie odległości d_k i kątów α_k dla różnych częstotliwości f_k ze zbiorem $\mathcal{H}$ opisującym "słuchacza standardowego", stanowi kryterium oceny wrażenia kierunku położenia źródła dźwięku. W dyskusji wykazano, że kryterium to może być dobrym narzędziem do badania systemów stereofonicznych. Można bowiem przyjąć, że słuchacz odbierając sygnały emitowane przez źródło dźwięku przesłane torem stereofonicznym, oceny kierunku położenia pozornego źródła dźwięku dokonywał będzie w oparciu o znane mu z doświadczeń słuchowo - wzrokowych współzależności wielkości ΔL_S^B , C_S^B , f i α .

6.6. Procedura obiektywnej oceny wrażenia kierunku położenia źródła dźwięku

Chcąc skorzystać z wprowadzonego kryterium, w pierwszej kolejności należy wyznaczyć parametry lokalizacyjne $L_{SL}(f)$, $L_{SP}(f)$, $\Delta L_S(f)$ i $C_S(f)$ w sposób opisany w rozdz. 4 i 5. Wyznaczenie tych parametrów możliwe jest na drodze teoretycznej, jak to wykazano na przykład w początkowych rozdziałach niniejszej pracy, bądź na drodze pomiarowej. Parametry L_{SL} i L_{SP} pozwalają na określenie widma sygnału emitowanego przez źródło dźwięku. Na ich podstawie możliwe jest wyznaczenie pasm częstotliwości, dla których wyznaczanie wielkości d_k i α_k jest zasadne np. ze względu na próg słyszenia. Jeśli ocenie poddany ma być tor przesyłowy od źródła dźwięku do uszu słuchacza, widmo sygnału emitowanego przez źródło powinno pokrywać cały rozpatrywany zakres częstotliwości.

Parametry lokalizacyjne ΔL_S i C_S , oprócz ich zależności od częstotliwości, zależą od wielu innych czynników. W przypadku systemu stereofonicznego, wpływ na ΔL_S i C_S mają takie czynniki jak kąt położenia źródła dźwięku względem mikrofonu, charakte-

rystyki mikrofonów wchodzących w skład mikrofonu koincydencyjnego, charakterystyki głośników, usytuowania głośników i słuchacza względem siebie, parametry opisujące odbicia od ścian pomieszczenia itd. /patrz rozdz. 3.4/. Dzięki kryterium wpływ każdego z czynników na lokalizację może być poddany gruntownej analizie.

Przy ocenie systemu stereofonicznego, należy wziąć pod uwagę zjawisko maskowania dźwięku późniejszego przez wcześniejszy. Zjawisko to badane było między innymi przez Franssena [7] oraz Mayera i Schoddera [36]. W wyniku badań ustalono, że jeśli dla danego opóźnienia czasowego różnica poziomów sygnałów emitowanych przez dwa źródła przekroczy pewną wartość progową, to źródło dźwięku emitujące sygnał o mniejszym poziomie, nie będzie przez słuchacza zauważane. Wartość progowa maskowania zależy od różnicy w czasach dotarcia do słuchacza sygnałów emitowanych przez te źródła. Dla opóźnień czasowych, których moduł jest mniejszy od 1 ms, wartość progowa maskowania wynosi ok. 10 dB. Oznacza to, że jeśli różnica w poziomach sygnałów podawanych na lewy i prawy głośnik jest co do modułu większa niż 10 dB, słuchacz zlokalizuje źródło dźwięku na kierunku, na którym znajduje się głośnik emitujący sygnał o większym poziomie, a efekt lokalizacyjny będzie naturalny.

Mając określone parametry lokalizacyjne $\Delta L_S(f)$ i $C_S(f)$ oraz korzystając z modelu decyzyjnego reprezentowanego przez zbiór $\mathcal{H}$, należy wyznaczyć odległości d_k i kąty α_k dla poszczególnych pasm częstotliwości.

Następnie, na podstawie d_k i α_k , możliwa jest obiektywna ocena danego wrażenia lokalizacyjnego. Wrażenie kierunku będzie tym lepsze, im:

- odległości d_k będą mniejsze,
- kąty α_k wykazywać będą mniejszy rozrzut wokół pewnej wartości

średniej.

Poza tym system stereofoniczny powinien dawać możliwość umieszczenia pozornego źródła dźwięku w dowolnym punkcie bazy.

W niniejszym rozdziale, w oparciu o wyniki obliczeń, zbudowano model decyzyjny lokalizacji źródła dźwięku /patrz rozdz. 6.2 i 6.3/. Model ten opisany jest przez zależność różnicy poziomów ΔL_S i opóźnienia czasowego C_S od częstotliwości i kąta położenia źródła dźwięku względem słuchacza, dla odbioru bezpośredniego w warunkach bezpogłosowych. Model decyzyjny w przestrzeni czterowymiarowej reprezentowany jest przez zbiór $\mathcal{H}$. Następnie wprowadzono pojęcie odległości ważonej d_k od zbioru $\mathcal{H}$ oraz pojęcie kąta α_k związanego z odległością d_k /patrz rozdz. 6.4/. W oparciu o model decyzyjny oraz pojęcie odległości d_k i kąta α_k , sformułowano kryterium pozwalające na ocenę wrażenia kierunku położenia źródła dźwięku /patrz rozdz. 6.5/. Kryterium to opiera się na fakcie, że dla odbioru bezpośredniego w warunkach bezpogłosowych, lokalizacja jest zawsze prawidłowa i naturalna. Wykazano, że kąt α_k opisuje położenie źródła dźwięku, natomiast odległość d_k może być miarą naturalności wrażenia lokalizacyjnego.

Odległość d_k i kąt α_k są funkcjami częstotliwości. Jeśli źródło dźwięku emituje sygnał o złożonej strukturze widmowej, należy określić d_k i α_k dla wszystkich pasm częstotliwości występujących w sygnale /patrz rozdz. 6.6/. Aby oceniane wrażenie kierunku można było uznać za dobre, musi być spełniony warunek, że kąty α_k dla poszczególnych częstotliwości f_k wykazują niewielki rozrzut /najlepiej zerowy/ wokół pewnej wartości średniej i że odległości d_k są małe.

Przedstawione kryterium jest propozycją obiektywnego podejścia do oceny efektu lokalizacyjnego. Nie wymaga ono badań subiektywnych. Na potrzebę sformułowania takiego kryterium zwracał uwagę

Blauert [7].

Rezultaty otrzymane w wyniku zastosowania zaproponowanego kryterium, wykazują dobrą zgodność ze znanymi z literatury wynikami badań subiektywnych /patrz rozdz. 6.5 i 7.3/. Jednak w trakcie prowadzenia dalszych badań może okazać się, że niektóre założenia wymagają korekty. Możliwości takiej korekty istnieją i mogą być dokonane przez zmianę zależności współczynników wagowych W_{Lk} i W_{Ck} od częstotliwości /patrz zal. /6.6// lub zmianę wielkości normujących M_{Lk} i M_{Ck} /patrz zal. /6.1/ i /6.2//.

Mimo, że kryterium budowane było z myślą o wykorzystaniu go do oceny dwukanałowego głośnikowego systemu stereofonii natężeniowej, kryterium to może być wykorzystywane do oceny dowolnego dwukanałowego głośnikowego systemu stereofonii natężeniowej.

W rozdz. 7 wykorzystano zaproponowane kryterium do oceny rozważanego systemu stereofonicznego i można to traktować również jako przykład zastosowania kryterium.

Rozdział 7

OBIEKTYWNA OCENA DWUKANAŁOWEGO GŁOŚNIKOWEGO SYSTEMU STEREOFONII NATEŻENIOWEJ

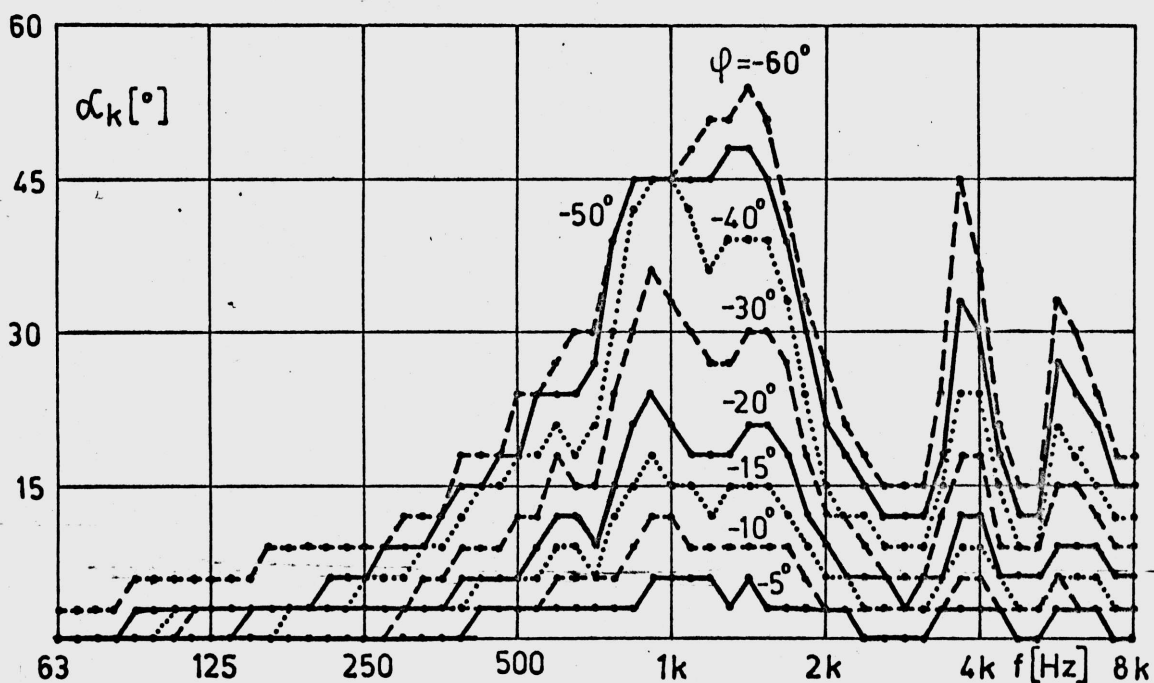
7.1. Analiza współzależności kątów α_k

W niniejszym rozdziale ocenie poddano dwukanałowy głośnikowy system stereofonii nateżeniowej, sprowadzony do przypadku teoretycznego. W stosunku do ogólnego modelu systemu założono, że pomieszczenia nadawcze i odbiorcze są pomieszczeniami bezpogłosowymi oraz że lewy i prawy kanał są kanałami symetrycznymi. Dokładny opis takiego systemu przedstawiono w rozdz. 3.5.

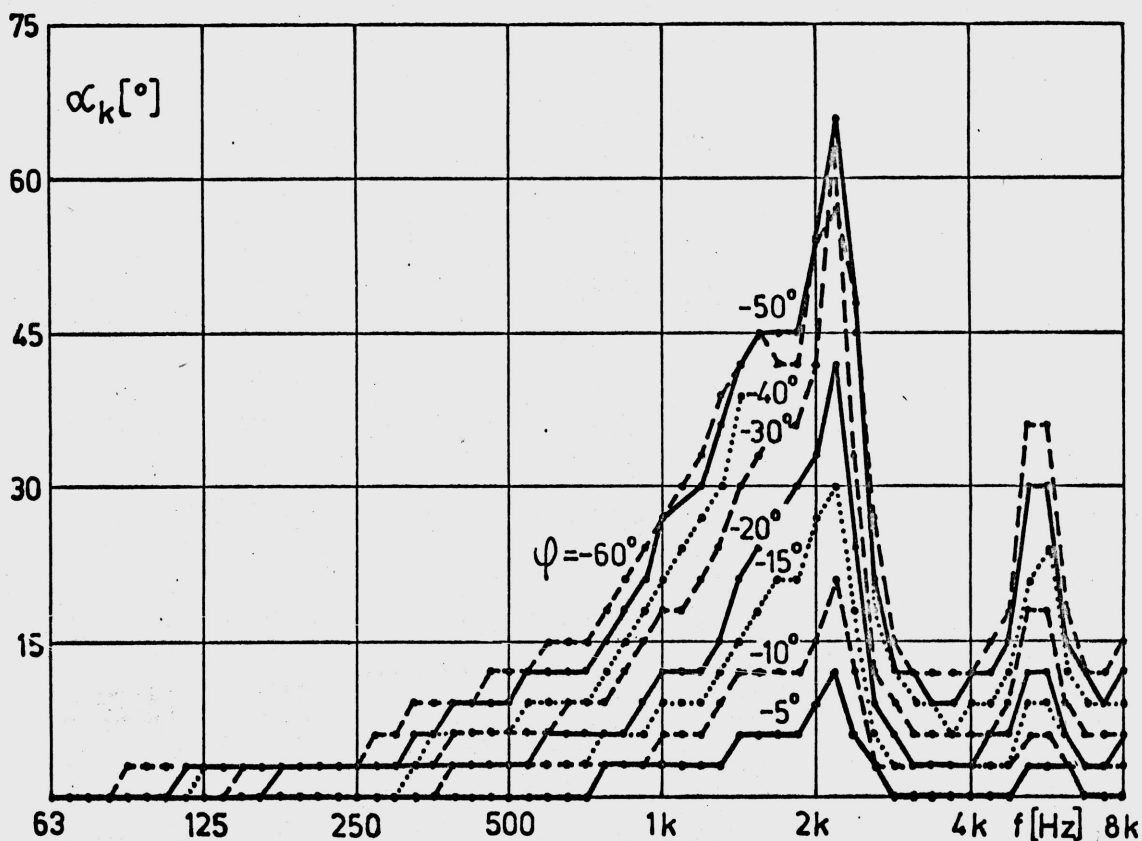
Na podstawie określonych w rozdz. 5 różnic poziomów ΔL_S oraz korzystając z kryterium przedstawionego w rozdz. 6, obliczono odległości d_k i kąty α_k . Obliczenia wykonano za pomocą programu opisanego w Dodatku C. Zbiór $\mathcal{H}$ zadawany był dla kątów α będących wielokrotnością 3° . Z tego powodu, dyskretyzacja kątów α_k wynosiła również 3° . Na rys. 7.1 - 7.4 przedstawiono wykresy zależności kątów α_k od częstotliwości dla przypadków: MK90 - rys. 7.1, MK60 - rys. 7.2, M090 - rys. 7.3 i M060 - rys. 7.4.

Po przeprowadzeniu analizy wyników przedstawionych na rys. 7.1 - 7.4, można stwierdzić że:

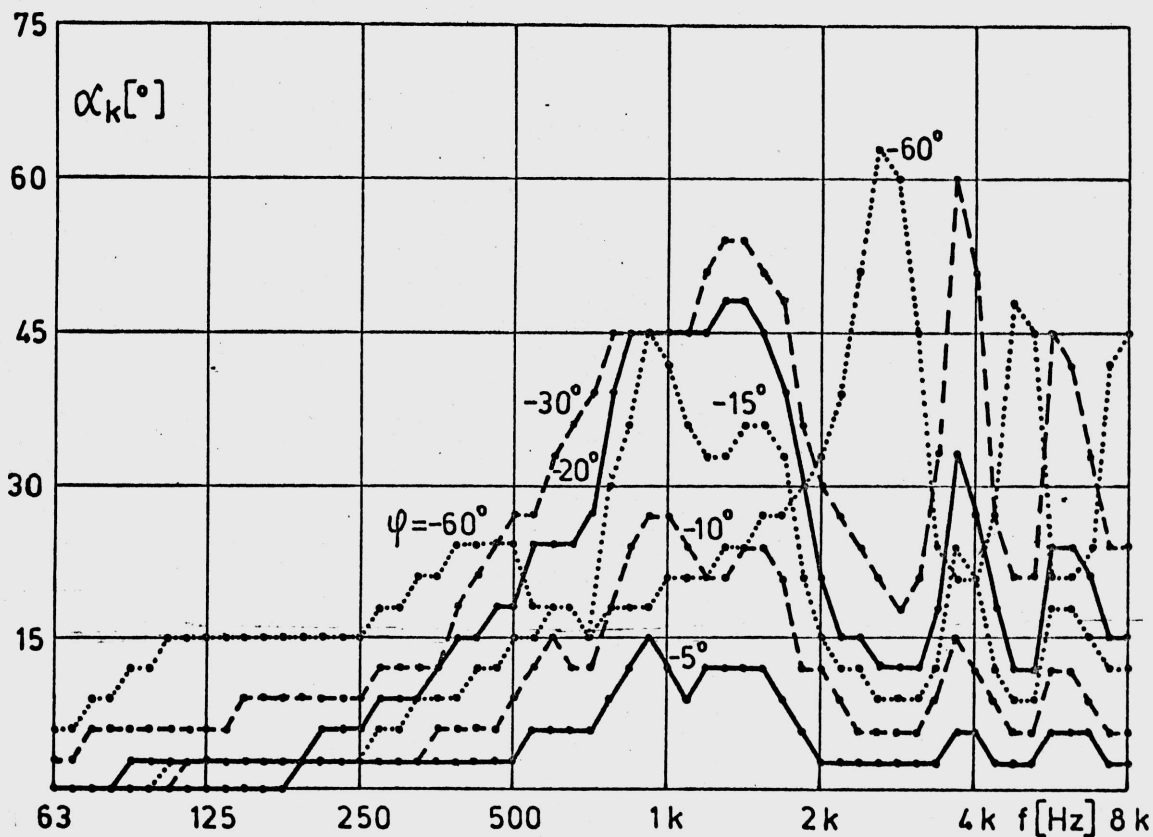
- dla kątów φ położenia źródła dźwięku względem mikrofonu z przedziału $-30^\circ < \varphi < 30^\circ$, wszystkie rozpatrywane przypadki systemu stereofonicznego zapewniają takie odwzorowanie, że większemu kątowi φ odpowiada większy kąt α_k położenia pozornego



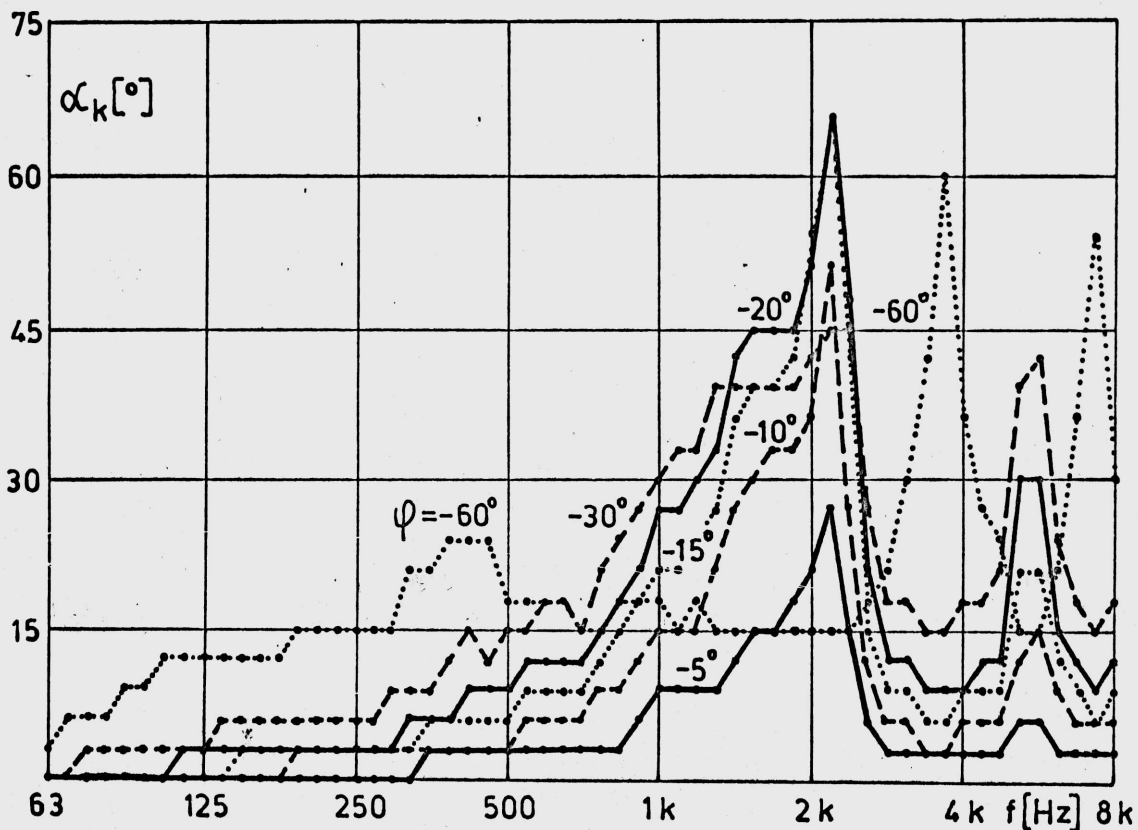
Rys. 7.1. Kąty α_k położenia pozornego źródła dźwięku względem słuchacza dla przypadku MK90



Rys. 7.2. Kąty α_k położenia pozornego źródła dźwięku względem słuchacza dla przypadku MK60



Rys. 7.3. Kąty α_k położenia pozornego źródła dźwięku względem słuchacza dla przypadku M090



Rys. 7.4. Kąty α_k położenia pozornego źródła dźwięku względem słuchacza dla przypadku M060

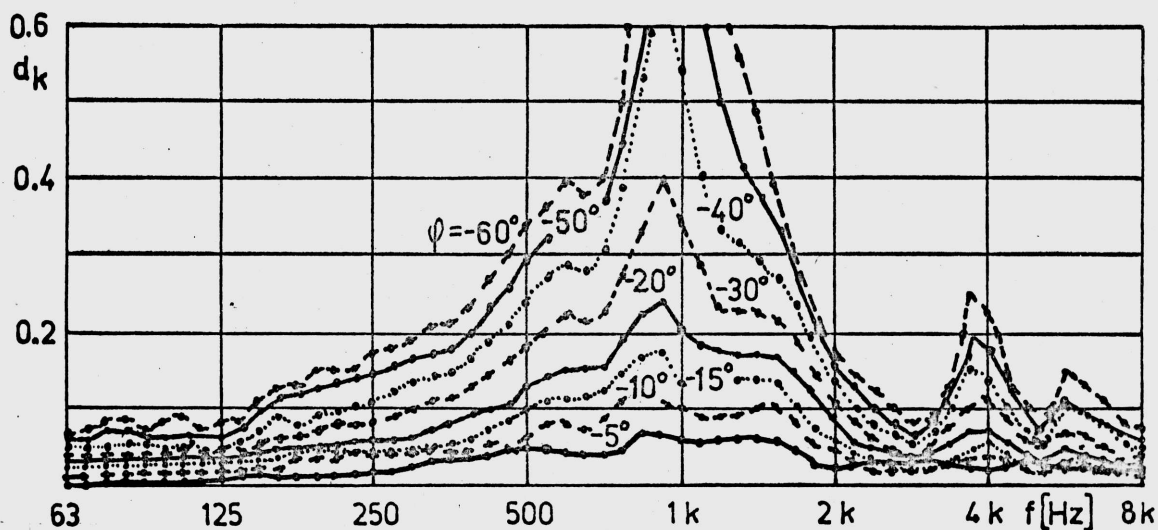
źródła dźwięku względem słuchacza,

- różnym pasmom widma sygnału emitowanego przez źródło dźwięku, umieszczonego pod danym kątem φ , odpowiadają różne kierunki położenia pozornego źródła dźwięku. Dla przykładu z rys. 7.1 wynika, że dla kąta $\varphi = -40^\circ$ różne pasma widma źródła wytwarzają wrażenia kierunku od $\alpha_k = 0^\circ$ do $\alpha_k = -45^\circ$. W wyniku tego wystąpi wrażenie "rozmazania" źródła dźwięku emitującego złożone struktury widmowe. Punktowe źródło dźwięku zajmować będzie pewien odcinek bazy. Dla przytoczonego przykładu będzie to połowa odległości między głośnikami,
- jeśli źródło dźwięku emitować będzie sygnał, którego widmo skupione będzie wokół pewnej częstotliwości, to ze zmianą tej częstotliwości źródło pozorne zmieniać będzie swoje położenie na bazie,
- jeśli źródło dźwięku emitować będzie sygnał, którego widmo zawarte jest w dolnym zakresie częstotliwości akustycznych, to pozorne źródło dźwięku zawsze lokalizowane będzie w pobliżu środka bazy,
- w ograniczonych pasmach częstotliwości możliwe jest wytwarzanie pozornych źródeł dźwięku, lokalizowanych poza odcinkiem bazy. Wspomniane pasma odpowiadają pasmom, dla których parametr ΔL_S przyjmuje największe wartości /patrz rys. 5.8 - 5.11/.

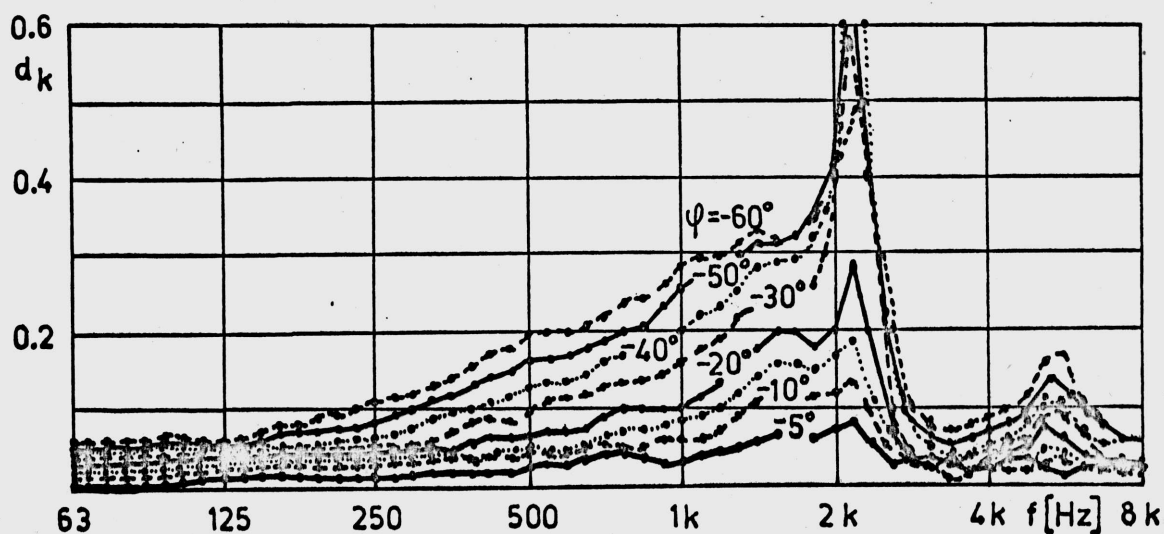
7.2. Naturalność wytwarzanego wrażenia kierunku

Na rys. 7.5 - 7.8 przedstawiono wykresy odległości d_k w funkcji częstotliwości, odpowiadające kątom α_k dla przypadków MK90, MK60, M090 i M060 odpowiednio.

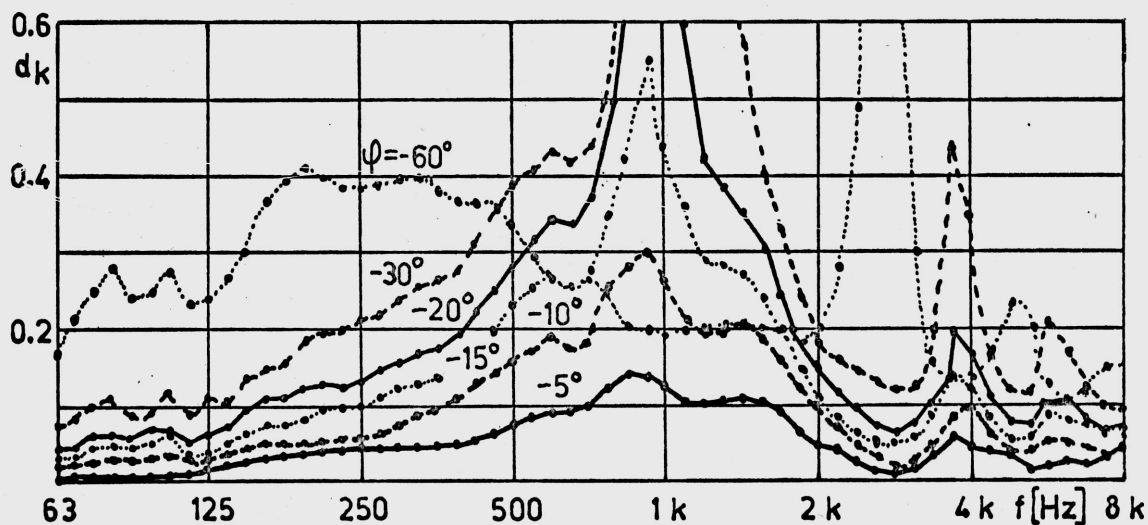
W rozdz. 6 wykazano, że odległość d_k może być miarą naturalności wrażenia lokalizacyjnego, wytwarzanego za pośrednictwem systemu stereofonicznego. Nienaturalność jest tutaj rozumiana



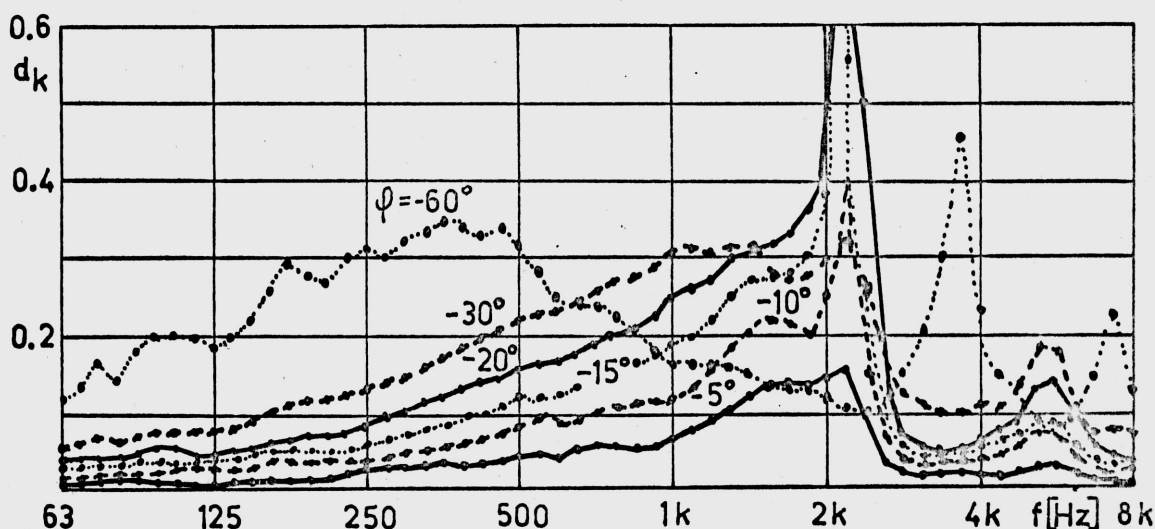
Rys. 7.5. Odległości d_k dla przypadku MK90



Rys. 7.6. Odległości d_k dla przypadku MK60



Rys. 7.7. Odległości d_k dla przypadku M090



Rys. 7.8. Odległości d_k dla przypadku M060

jako sprzeczność informacji zawartych w częstotliwości, różnicy poziomów ΔL_S i opóźnieniu czasowym C_S co do kierunku położenia źródła dźwięku. Konsekwencją tych sprzeczności mogą być trudności w zlokalizowaniu pozornego źródła dźwięku. Dla sygnałów przesyłanych za pomocą dwukanałowej głośnikowej stereofonii natężeniowej, opóźnienie czasowe C_S /przy założonej symetrii/ jest równe zero. Natomiast różnice poziomów ΔL_S , dla niektórych pasm częstotliwości, przyjmują wartości powyżej 15 dB. W zakresie średnich częstotliwości, dla których ΔL_S i C_S współmiernie wpływają na lokalizację źródła dźwięku, współistnienie tak sprzecznych wartości ΔL_S i C_S powoduje, że odległość d_k przyjmuje duże wartości. Często są to wartości powyżej 0.4. Można przyjąć, że tak duże wartości d_k odpowiadają nienaturalności wrażenia kierunku położenia źródła dźwięku.

W zakresie małych i dużych częstotliwości, dla których decydujący wpływ na lokalizację ma albo opóźnienie czasowe albo różnica poziomów, odległość d_k przyjmuje stosunkowo małe wartości /do ok. 0.2/.

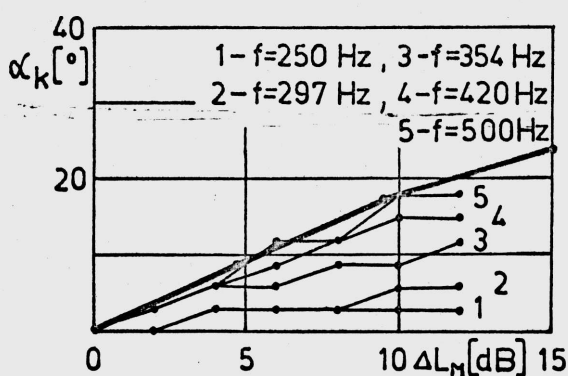
7.3. Porównanie otrzymanych wyników z wynikami badań psychofizjologicznych

Badania psychofizjologiczne nad lokalizacją pozornych źródeł dźwięku, wytwarzanych za pomocą dwukanałowego głośnikowego systemu stereofonicznego, prowadzone były przez różnych badaczy /De Boer [12], Hass [24], Leackey [29], Snow [58], Wendt [61]/. Zasadnicza część tych badań wykonana została przy użyciu sygnałów o złożonej strukturze widmowej, a więc decyzje słuchaczy były decyzjami sumarycznymi /średnia z wrażeń dla kolejnych pasm częstotliwości/. Porównanie więc tych wyników z wynikami uzyskanymi w niniejszej pracy jest niemożliwe. Z przeprowadzonych w tej pracy rozważań wynika bowiem, że dla różnych pasm częstotliwości, dla tej samej różnicy poziomów sygnałów podawanych na głośniki, pozorne źródła dźwięku lokalizowane będą pod różnymi kątami.

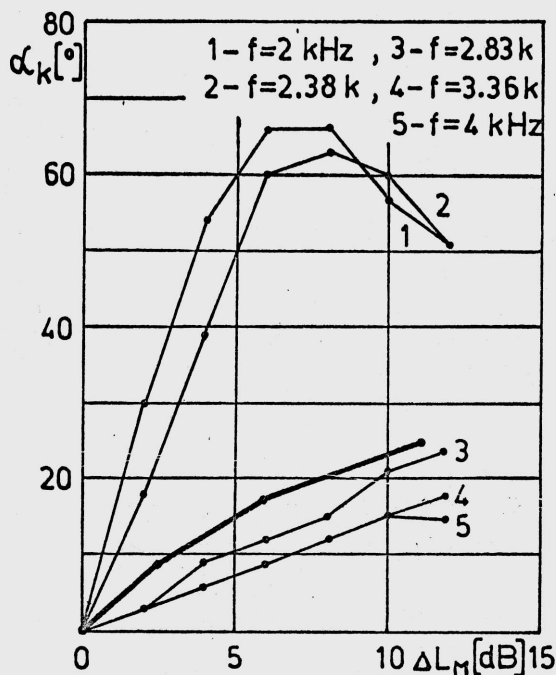
W ograniczonym zakresie, subiektywne badania efektu lokalizacji wykonywane były również przy użyciu szumów pasmowych jako sygnału emitowanego przez głośniki /Leackey [29], Wendt [61]/. W pracy Leackeya przedstawione zostały wyniki badań efektu lokalizacji wytwarzanego przez szum pasmowy o szerokości oktawy. Badania te wykonane zostały w warunkach bezpogłosowych, dla kąta rozstawienia głośników około 64° . Z wynikami tymi porównane zostaną wyniki uzyskane w niniejszej pracy, dla kąta rozstawienia głośników $2\theta = 60^{\circ}$.

Na rys. 7.9 i 7.10 przedstawiono zależności kąta α_k położenia pozornego źródła dźwięku od różnicy poziomów sygnałów podawanych na głośniki. Różnice poziomów chwilowych widm mocy sygnałów podawanych na głośniki oznaczono przez ΔL_M . Na rysunkach tych, za pomocą grubych linii, przedstawiono zależności uzyskane

przez Leackeya dla pasma szumu o szerokości oktawy, zawartego w granicach: od 250 Hz do 500 Hz - rys. 7.9 i od 2 kHz do 4 kHz - rys. 7.10, oraz, za pomocą linii cienkich, zależności uzyskane w niniejszej pracy dla szumu o szerokości 1/8 oktawy, dla częstotliwości środkowych pasm: 250 Hz, 297 Hz, 354 Hz, 420 Hz, 500 Hz - rys. 7.9 i 2 kHz, 2.38 kHz, 2.83 kHz, 3.36 kHz, 4 kHz - rys. 7.10.



Rys. 7.9. Zależności kąta α_k położenia pozornego źródła dźwięku od różnicy poziomów ΔL_M sygnałów podawanych na głośniki



Rys. 7.10. Zależności kąta α_k położenia pozornego źródła dźwięku od różnicy poziomów ΔL_M sygnałów podawanych na głośniki

Zależności uzyskane przez Wendta [61] mają podobny przebieg do tych uzyskanych przez Leackeya i z tego powodu nie będą tutaj przedstawiane.

Z porównania zależności przedstawionych na rys. 7.9 i 7.10 wynika, że ogólne tendencje tych zależności są zgodne. Rozbieżności przedstawionych zależności spowodowane są większą rozdzielczością wyników uzyskanych w niniejszej pracy.

W niniejszym rozdziale dokonano oceny dwukanałowego głośnikowego systemu stereofonii natężeniowej. Oceny dokonano w oparciu o wyniki obliczeń dla odbioru za pośrednictwem systemu stereofonicznego /patrz rozdz. 5.4/ oraz zaproponowane w rozdz. 6 kryterium oceny wrażenia lokalizacyjnego.

Ustalono, że oceniany system nie zapewnia dobrego przeniesienia położenia źródła dźwięku z pomieszczenia nadawczego do pomieszczenia odbiorczego /patrz rozdz. 7.1/. Także naturalność wywoływanego wrażenia lokalizacyjnego nie jest zadawalająca /patrz rozdz. 7.2/. W rozdz. 7.3 porównano otrzymane wyniki oceny z wynikami badań psychofizjologicznych znanymi z literatury [29, 61]. Można stwierdzić, że oceny te są zbliżone, choć wyniki uzyskane w niniejszej pracy dokładniej charakteryzują wrażenia lokalizacyjne.

Rozdział 8

ZAKOŃCZENIE

W pracy niniejszej zaproponowano efektywne kryterium oceny wrażenia kierunku położenia źródła dźwięku oraz dokonano oceny dwukanałowego głośnikowego systemu stereofonii natężeniowej. Do realizacji tych celów wykorzystano znane z literatury wyniki badań subiektywnych jak i wyniki obiektywnych pomiarów dotyczących słyszenia przestrzennego.

W celu zbudowania kryterium oraz stworzenia możliwości jego zastosowania, należało wyznaczyć parametry sygnałów docierających do błon bębenkowych dla różnych sposobów przejścia sygnału od źródła dźwięku do uszu słuchacza. Wyznaczenie parametrów sygnałów możliwe było dzięki zbudowaniu modeli matematycznych:

- odbioru bezpośredniego dla warunków bezpogłosowych i pogłosowych /patrz rozdz. 2/,
- odbioru za pośrednictwem rozważanego systemu stereofonicznego /patrz rozdz. 3/.

Modele opisujące odbiór bezpośredni, uwzględniają następujące czynniki kształtujące sygnały dochodzące do uszu słuchacza:

- położenie źródła dźwięku względem słuchacza,
- odpowiedzi impulsowe opisujące zewnętrzny system słuchowy,
- parametry charakteryzujące odbicia od ścian pomieszczenia /dla warunków pogłosowych/.

W literaturze nie ma takich modeli.

Za model sygnału emitowanego przez źródło dźwięku przyjęto

niestacjonarny proces losowy. Sygnał emitowany przez źródło dźwięku oraz sygnały docierające do uszu słuchacza opisywane były za pomocą dwuwymiarowych funkcji autokorelacji /patrz rozdz. 2.1/. Taki sposób opisu sygnałów umożliwia uwzględnienie ich niestacjonarności, która jak wykazują badania psychofizjologiczne /patrz rozdz. 4.1 i 4.3/ ma istotny wpływ na lokalizację źródła dźwięku.

Każdy słuchacz posiada indywidualne odpowiedzi impulsowe opisujące jego zewnętrzny system słuchowy. Nie jest jednak możliwe przeprowadzenie analizy dla każdego słuchacza z osobna. Z tego powodu, w rozważaniach stosowane były odpowiedzi impulsowe obliczone na podstawie modułów funkcji przejścia z pola swobodnego do błony bębenkowej ucha dla "słuchacza standardowego" /patrz rozdz. 2.3 i 2.4/.

W rozdz. 4, w ramach korelacyjnej teorii sygnałów, uwzględniając właściwości organu słuchu, wprowadzono matematyczne definicje znanych z badań psychofizjologicznych, parametrów lokalizacyjnych. Parametry lokalizacyjne są charakterystykami sygnałów docierających do uszu słuchacza, na podstawie których dokonuje się oceny kierunku położenia źródła dźwięku. W pracy posługiwano się następującymi parametrami:

- poziomami chwilowych widm mocy L_{SL} i L_{SP} ,
- różnicą poziomów chwilowych widm mocy ΔL_S ,
- opóźnieniem czasowym C_S .

Znane z literatury definicje parametrów lokalizacyjnych są mało precyzyjne. Nie uwzględniają one bowiem złożoności widmowej struktury sygnałów bądź zależności parametrów lokalizacyjnych od czasu.

Opracowanie metody wyznaczania dwuwymiarowych funkcji autokorelacji sygnałów docierających do uszu słuchacza dało między innymi możliwość zbadania wpływu fal odbitych na parametry lokaliza-

cyjne w sytuacji bezpośredniego odbioru sygnału emitowanego przez źródło dźwięku. Analizowano wyłącznie różnicę poziomów ΔL_S , gdyż poziomy chwilowych widm mocy L_{SL} i L_{SP} w lokalizacji źródeł dźwięku spełniają funkcję pomocniczą /patrz rozdz. 6.6/. Opóźnienia czasowego C_S nie analizowano, gdyż fale odbite nie mają na nie wpływu. Biorąc za punkt odniesienia warunki bezpogłosowe, w wyniku obliczeń ustalono, że /patrz rozdz. 5.3.2/:

- w przypadku dobrych warunków akustycznych, fale odbite nie powodują większych niż 3 dB zmian różnicy poziomów ΔL_S ,
- w przypadku złych warunków akustycznych, zmiany te mogą przekraczać 10 dB.

Model opisujący przejście sygnału od źródła dźwięku do uszu słuchacza za pośrednictwem dwukanałowego głośnikowego systemu stereofonii natężeniowej, uwzględnia następujące czynniki kształtujące sygnały docierające do uszu słuchacza /patrz rozdz. 3.4/:

- położenie źródła dźwięku względem mikrofonu koincydencyjnego,
- odpowiedzi impulsowe mikrofonów wchodzących w skład mikrofonu koincydencyjnego,
- parametry opisujące odbicia od ścian pomieszczenia nadawczego,
- odpowiedzi impulsowe głośników,
- odpowiedzi impulsowe zewnętrznego systemu słuchowego człowieka,
- położenie głośników względem słuchacza,
- położenie słuchacza względem głośników.

Poprzez przyjęcie założeń dotyczących wzajemnego usytuowania elementów systemu względem siebie oraz dotyczących odpowiedzi impulsowych tych elementów, ogólny model systemu stereofonicznego sprowadzono do modelu systemu teoretycznego /patrz rozdz. 3.5/. Model systemu teoretycznego zawiera tylko te elementy, bez których przekaz stereofoniczny nie byłby możliwy.

Obydwa modele wykazują wiele zalet w stosunku do modeli zna-

nych z literatury. Przede wszystkim dają możliwość uwzględnienia złożoności struktury widmowej sygnałów oraz niestacjonarności sygnału emitowanego przez źródło dźwięku.

Dysponując modelem matematycznym teoretycznego systemu stereofonicznego, możliwe było wyznaczenie zależności różnicy poziomów ΔL_S od częstotliwości i kąta położenia źródła dźwięku względem mikrofonu. Rozważono cztery warianty dwukanałowej głośnikowej stereofonii natężeniowej. W wyniku obliczeń /patrz rozdz. 5.4/ ustalono, że charakterystyki kierunkowości mikrofonów oraz kąt rozstawienia głośników mają istotny wpływ na różnicę poziomów ΔL_S . Opóźnienie czasowe C_S , ze względu na założoną symetrię systemu stereofonicznego jest tożsamościowo równe zero. Poza tym, z porównania wykresów różnicy poziomów ΔL_S wynika, że dla systemu stereofonicznego, zależność różnicy poziomów od częstotliwości dla każdego z rozważanych wariantów i dowolnego kąta położenia źródła dźwięku względem mikrofonu, ma zupełnie inny przebieg niż dla odbioru bezpośredniego w warunkach bezpogłosowych. Obydwie te różnice mają istotny wpływ na wrażenie kierunku położenia źródła dźwięku /patrz rozdz. 7/.

W oparciu o wyniki obliczeń, zbudowano model decyzyjny opisujący współzależność kąta położenia źródła dźwięku względem słuchacza, częstotliwości, różnicy poziomów ΔL_S i opóźnienia czasowego C_S , dla przypadku odbioru bezpośredniego w warunkach bezpogłosowych /patrz rozdz. 6.2 i 6.3/. W przestrzeni czterowymiarowej model ten reprezentowany jest przez zbiór $\mathcal{X}$. W oparciu o model decyzyjny oraz wprowadzone pojęcia odległości d_k i kąta α_k , sformułowano kryterium oceny kierunku położenia źródła dźwięku /patrz rozdz. 6.4 i 6.5/. Kryterium to opiera się na spostrzeżeniu, że lokalizacja w przypadku odbioru bezpośredniego w warunkach bezpogłosowych jest zawsze prawidłowa i naturalna. Dzięki

kryterium, na podstawie różnicy poziomów ΔL_S i opóźnienia czasowego C_S sygnałów docierających do uszu słuchacza, które są funkcjami częstotliwości, możliwa jest ocena wrażenia lokalizacyjnego wytwarzanego przez system stereofoniczny. Wprowadzone kryterium pozwala także na oszacowanie naturalności danego wrażenia kierunku. Kryterium nie wymaga prowadzenia badań psychofizjologicznych. Badania psychofizjologiczne są co prawda podstawową metodą zbierania informacji o działaniu pewnych funkcji organu słuchu człowieka, jednak ze względu na ich dużą pracochłonność i duży rozrzut uzyskiwanych wyników, używanie ich do oceny systemów stereofonicznych jest niewygodne. W rozdz. 6.6 podano procedurę wykorzystywania zaproponowanego kryterium.

Kryterium oceny wrażenia kierunku położenia źródła dźwięku budowane było z myślą o wykorzystaniu go do oceny dwukanałowego głośnikowego systemu stereofonii natężeniowej. Ocena ta była możliwa dzięki istnieniu kryterium oraz dzięki możliwości wyznaczenia parametrów lokalizacyjnych sygnałów docierających do uszu słuchacza. W wyniku przeprowadzonej oceny systemu stereofonicznego stwierdzono, że /patrz rozdz. 7.1 i 7.2/:

- system w zadawalającym przedziale kątów położenia źródła dźwięku względem mikrofonu, zapewnia jednoznaczne odwzorowanie tego kąta w kąt położenia pozornego źródła dźwięku,
- różnym pasmom widma sygnału emitowanego przez punktowe źródło dźwięku odpowiadają różne kierunki położenia pozornego źródła dźwięku. Konsekwencją tego jest przekształcenie punktowego źródła w źródło rozłożone na znacznym odcinku bazy,
- źródła dźwięku emitujące sygnały o widmie zawartym w dolnym zakresie częstotliwości akustycznych, lokalizowane są zawsze w pobliżu środka bazy,
- źródło dźwięku, ze zmianą częstotliwości emitowanego sygnału,

zmienia swoje położenie na bazie,

- kształtowane przez system stereofoniczny sygnały, nie zapewniają naturalnego wrażenia kierunku dla całego akustycznego pasma częstotliwości.

W rozdz. 7.3 porównano wyniki oceny uzyskanej na podstawie kryterium z wynikami badań psychofizjologicznych znanymi z literatury. Można stwierdzić, że oceny te są zbieżne, ale wyniki uzyskane w niniejszej pracy dokładniej charakteryzują wrażenie lokalizacyjne.

W oparciu o zaproponowane kryterium możliwa jest ocena dowolnego dwukanałowego głośnikowego systemu stereofonicznego. Metoda ta pozwala więc na porównywanie różnych systemów stereofonicznych, a w efekcie daje możliwość skonstruowania takiego systemu stereofonicznego, który zapewniał będzie poprawne wrażenie kierunku położenia pozornego źródła dźwięku. W próbach skonstruowania takiego systemu należy, zgodnie z zaproponowanym kryterium, dążyć do zapewnienia przez system takiej różnicy poziomów ΔL_S i takiego opóźnienia czasowego C_S , aby kąty α_k wykazywały możliwie mały rozrzut wokół pewnej wartości średniej oraz aby odległości d_k dla całego pasma akustycznego były jak najmniejsze. Poza tym pozorne źródło dźwięku powinno dać się umieścić w dowolnym punkcie bazy. Zagadnienie skonstruowania takiego systemu wymaga jednak osobnych badań i wykracza poza sprecyzowany we wstępie cel pracy.

Biorąc pod uwagę nakreślone w zakończeniu wyniki rozważań uzyskane w niniejszej pracy, autor uważa, że cel pracy został osiągnięty.

Dodatek A

CZYNNIKI KSZTAŁTUJĄCE PARAMETRY SYGNAŁÓW DOCIERAJĄCYCH DO BŁON BĘBENKOWYCH USZU SŁUCHACZA

Sygnały emitowane przez rzeczywiste źródło dźwięku, podczas przejścia do błon bębenkowych uszu słuchacza, poddawane są istotnym przekształceniom będącym wynikiem zachodzenia zjawisk fizycznych takich jak: opóźnienia czasowe, dyfrakcje, interferencje, odbicia i rezonanse. Zjawiska te są konsekwencją położenia uszu w dwóch różnych punktach przestrzeni oraz zakłócającego działania przeszkody akustycznej, jaką jest bryła głowy słuchacza.

Można wyodrębnić następujące elementy zewnętrznego systemu słuchowego, wpływające na sygnały docierające do błon bębenkowych:

- a. rozstawienie uszu w różnych punktach przestrzeni,
- b. bryła głowy z wyłączeniem uszu,
- c. małżowina uszna,
- d. ramiona,
- e. concha,
- f. kanał uszny.

ad. a. Konsekwencją położenia uszu w różnych punktach przestrzeni jest opóźnienie czasowe, występujące między sygnałami prawego i lewego ucha. Gdy źródło dźwięku nie jest umieszczone w płaszczyźnie symetrii głowy, wówczas fale dźwiękowe przechodzące od źródła do uszu słuchacza mają do pokonania różne drogi, a tym samym występuje między nimi opóźnienie czasowe. Opóźnienie to występuje dla całego zakresu częstotliwości i jest zależne od czę-

stotliwości /Abbagnaro, Bauer, Torick [1], Feddersen, Sandel, Teas, Jeffress [17]/.

ad. b. Ponieważ dla fal dźwiękowych emitowanych przez źródło dźwięku, głowa słuchacza jest przeszkodą akustyczną, sygnał docierający do ucha będącego dalej od źródła, podlega tłumieniu w stosunku do sygnału docierającego do ucha będącego bliżej źródła /Bauer, Torick [4], Blauert [6], Feddersen, Sandel, Teas, Jeffress [17], Shaw [54, 55]/. Tłumienie to jest różne dla różnych składowych widma sygnału. "Zacienianie" występuje wyraźnie dla częstotliwości powyżej 250 Hz.

ad. c. Skomplikowany kształt małżowiny usznej powoduje, że do błony bębenkowej docierają fale odbite od różnych fragmentów małżowiny usznej i te interferując między sobą tworzą sygnał wypadkowy. Wpływ małżowiny usznej ze względu na jej wymiary, jest wyraźny od częstotliwości ok. 4 kHz /Searle, Braida, Davis, Cuddy [52]/.

ad. d. Dla częstotliwości w okolicach 2.5 kHz /Searle, Braida, Davis, Colburn [53]/ wpływ na sygnał docierający do błony bębenkowej mają fale odbite od ramienia słuchacza. Fale odbite od ramienia, opóźnione o kilkaset mikrosekund, interferując z falą docierającą do ucha bezpośrednio, mają wpływ na sygnał wypadkowy.

ad. e. Concha dla częstotliwości ok. 6 kHz jest układem rezonansowym /Shaw, Teranishi [57]/. W związku z tym, składowe widma sygnału o tych częstotliwościach ulegają wzmocnieniu.

ad. f. Ostatnim ogniwem kształtującym sygnał wyemitowany przez źródło dźwięku jest kanał uszny zakończony błoną bębenkową. Kanał uszny posiada wyraźne właściwości wzmacniające w okolicach częstotliwości 4 kHz i 12 kHz /Djupešland, Zwislocki [14], Shaw, Teranishi [57]/.

Zjawiska wpływające na sygnały docierające do lewego i prawego ucha słuchacza nie mają identycznego ilościowego znaczenia. Wynika to z różnych kątów padania fali akustycznej na lewe i prawe ucho oraz z braku symetrii zewnętrznego systemu słuchowego. Brak symetrii powoduje, że nawet jeśli źródło dźwięku umieszczone jest w "płaszczyźnie symetrii" bryły głowy, sygnały docierające do błon bębenkowych lewego i prawego ucha nie są identyczne /Searle, Braida, Davis, Colburn [53]/. Według najnowszych badań, brak symetrii zewnętrznego systemu słuchowego, jest najważniejszym elementem umożliwiającym określenie kąta wertykalnego kierunku położenia źródła dźwięku /Searle, Braida, Cuddy, Davis [52], Roffler, Butler [48]/.

Dodatkowo, ponieważ każdy ze słuchaczy posiada indywidualny kształt zewnętrznego systemu słuchowego, przy takim samym sygnale emitowanym przez źródło dźwięku i położeniu źródła dźwięku względem słuchacza, sygnały odbierane przez różnych słuchaczy będą się różnić między sobą.

Mimo złożoności przestrzennych zjawisk, zachodzących podczas przejścia fali akustycznej od źródła dźwięku do błon bębenkowych, sygnały lewego i prawego ucha można traktować jako sygnały jednowymiarowe /Winckel [65]/. Fakt ten znalazł potwierdzenie w badaniach funkcji przejścia kanału usznego. Badania te wykazały, że funkcja przejścia kanału usznego nie zależy od kąta pod jakim fala akustyczna pada na ucho /Mehrgard, Mellert [33], Shaw, Teranishi [57], Wiener, Ross [64]/. Oznacza to, że wszystkie informacje kierunkowe kształtowane przez różne elementy zewnętrznego systemu słuchowego, w kanale usznym sumowane są w jednowymiarowy przebieg ciśnienia dźwięku w pobliżu błony bębenkowej. Spowodowane jest to małymi wymiarami kanału usznego, w stosunku do długości fal akustycznych i można się spodziewać, że właściwość ta utrzymuje się do co najmniej 12 kHz /Shaw, Teranishi [57]/.

Dodatek B

OBLICZANIE ODPOWIEDZI IMPULSOWYCH ZEWNĘTRZNEGO SYSTEMU SŁUCHOWEGO NA PODSTAWIE MODUŁÓW FUNKCJI PRZEJŚCIA

Z pomiarów przedstawionych w literaturze /patrz rozdz. 2.4/, znane są moduły funkcji przejścia H_{SL} zdefiniowanych w rozdz. 2.3. W celu wyznaczenia odpowiedzi impulsowych h_{SL} za pomocą odwrotnego przekształcenia Fouriera, niezbędna jest również znajomość argumentów funkcji H_{SL} . W literaturze brak jest takich danych. W tej sytuacji, możliwe jest określenie argumentów funkcji H_{SL} na podstawie ich modułów, przy założeniu że układ który opisują funkcje H_{SL} jest układem minimalnofazowym.

Dla układu minimalnofazowego, funkcje $\ln|H(e^{j\omega})|$ i $\arg H(e^{j\omega})$ tworzą parę transformat Hilberta /Oppenheim, Schaffer [41]/. Możliwe jest obliczenie argumentu funkcji przejścia korzystając bezpośrednio z określenia transformaty Hilberta. W praktyce jednak wygodniejsze jest stosowanie procedury podanej w pracy [41] Zgodnie z nią, w celu obliczenia odpowiedzi impulsowej na podstawie modułu funkcji przejścia, należy:

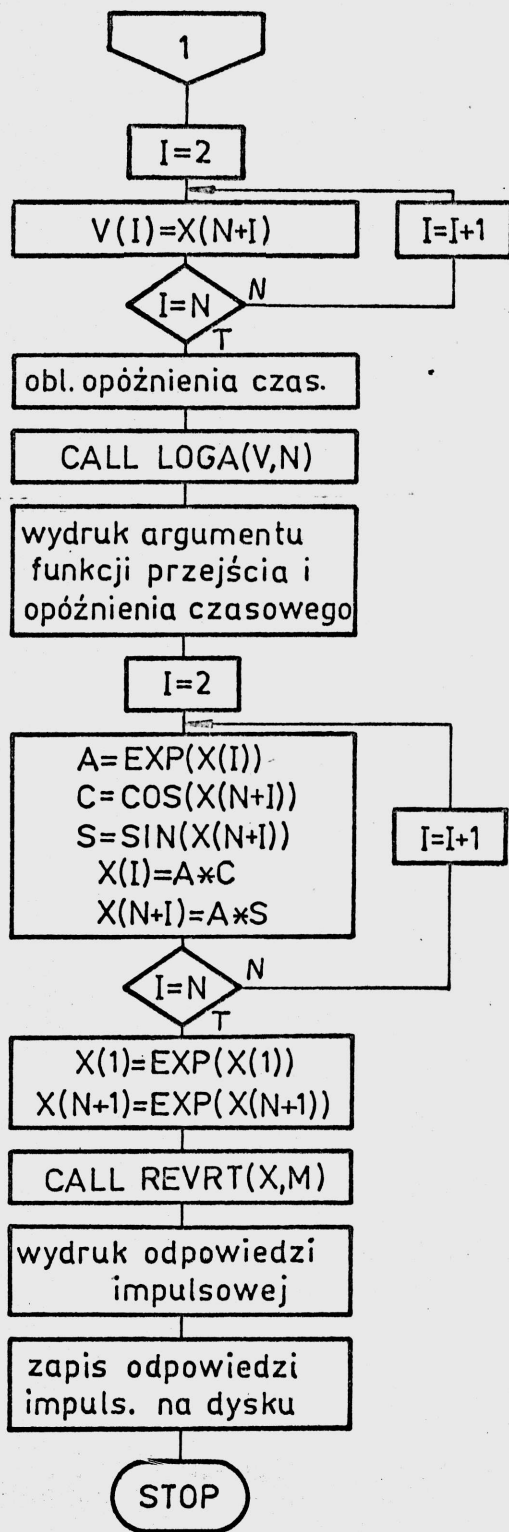
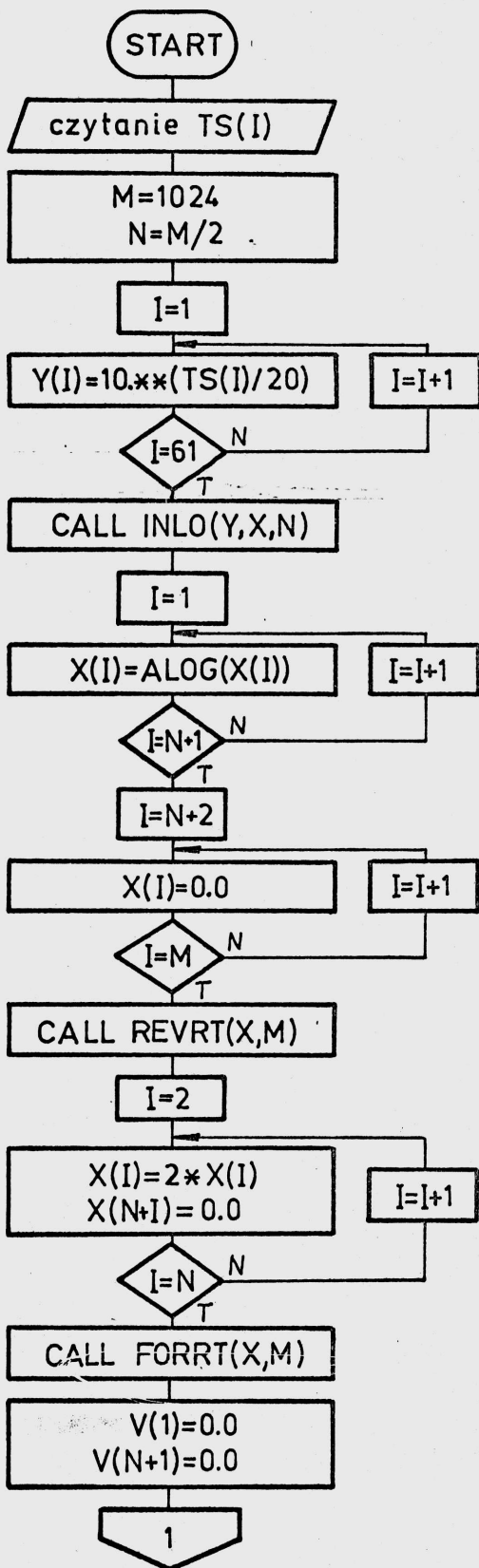
- obliczyć logarytm naturalny z modułu funkcji przejścia, tzn.
 $\ln|H(e^{j\omega})|$,
- obliczyć odwrotną transformatę Fouriera z logarytmu naturalnego modułu funkcji przejścia. W wyniku otrzymuje się pewien ciąg $\tilde{h}_e(t)$,
- z ciągu $\tilde{h}_e(t)$, który jest parzystą składową ciągu $\tilde{h}(t)$, należy utworzyć ciąg przyczynowy $\tilde{h}(t)$,

- obliczyć transformatę Fouriera ciągu $\tilde{h}(t)$. Część rzeczywista wyniku będzie równa $\ln|H(e^{j\omega})|$, natomiast część urojona będzie reprezentować funkcję $\arg H(e^{j\omega})$,
- obliczyć część rzeczywistą $H_R(e^{j\omega})$ i część urojoną $H_I(e^{j\omega})$ funkcji przejścia $H(e^{j\omega})$,
- za pomocą odwrotnej transformaty Fouriera, obliczyć minimalnofazową odpowiedź impulsową $h(t)$.

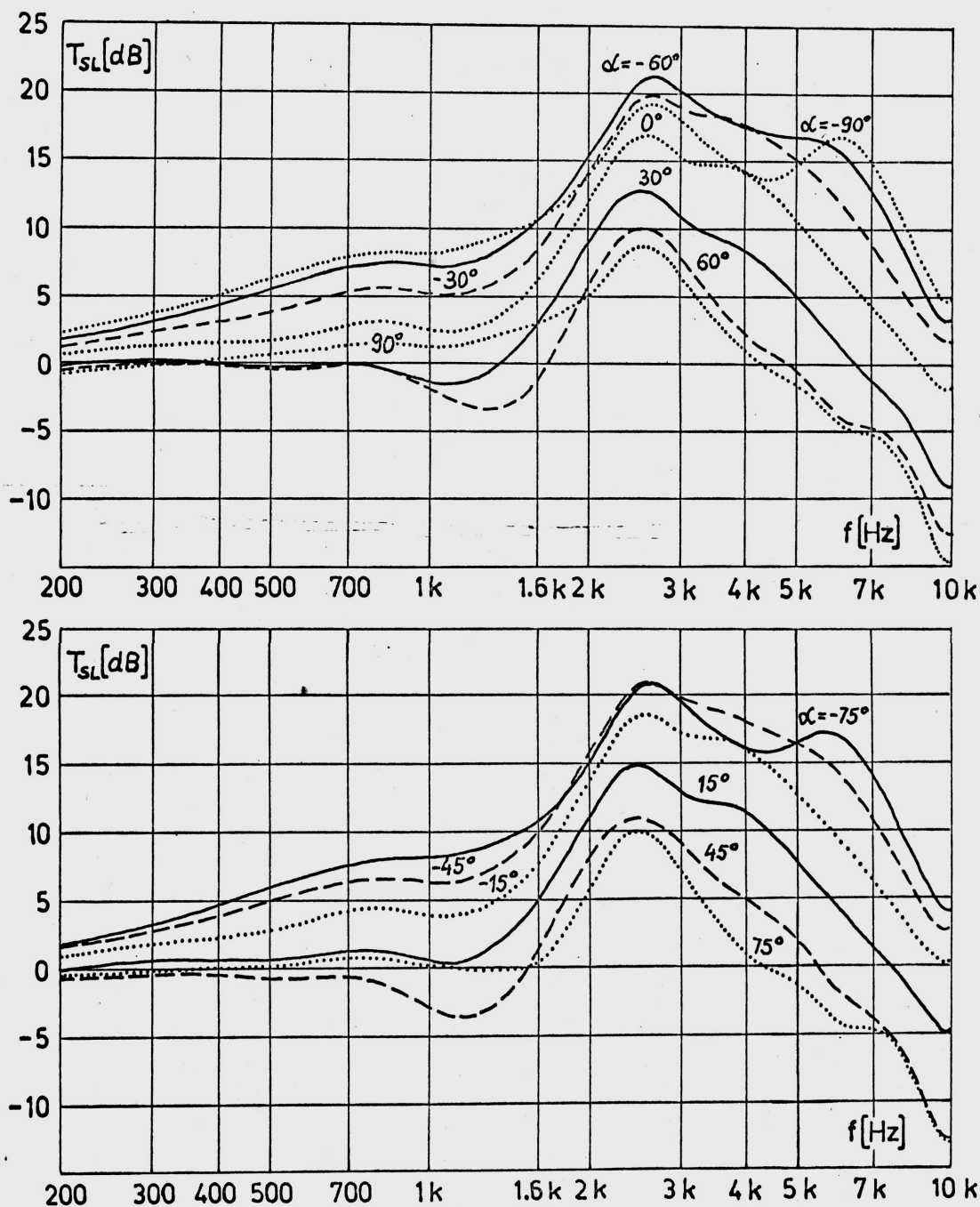
Korzystając z przedstawionej procedury, napisano program na maszynie cyfrową służący do obliczania odpowiedzi impulsowych na podstawie modułu funkcji przejścia. Schemat blokowy programu przedstawiono na rys. B.1.

Danymi wejściowymi do programu były wartości modułu funkcji przejścia H_{SL} . Na rys. B.2 przedstawiono rodzinę funkcji T_{SL} podanych przez Shawa [56]. Na rys. B.2 funkcje T_{SL} określone są dla częstotliwości większych niż 200 Hz. Ponieważ w analizie brany jest również pod uwagę zakres częstotliwości poniżej 200 Hz przyjęto, że dla częstotliwości mniejszych niż 200 Hz, funkcja T_{SL} przyjmuje wartości takie jak dla 200 Hz. Funkcje T_{SL} zadawane były w logarytmicznej skali częstotliwości co 1/8 oktawy /61 punktów, pierwszy dla 63 Hz/ oraz w decybelowej skali wartości. Po przeliczeniu skali wartości na liniową, konieczne było przeliczenie logarytmicznej skali częstotliwości na skalę liniową. Do tego celu służył podprogram INLO. W wywołaniu programu INLO, Y jest tablicą w skali logarytmicznej zaś X tablicą w skali liniowej. W programie wykorzystano szybkie algorytmy obliczania transformat Fouriera podane przez Monro [37, 38]. Podprogram FORRT służy do obliczania prostej transformaty Fouriera, natomiast podprogram REVRT do obliczania odwrotnej transformaty Fouriera.

Z programu wyprowadzano argument θ_{SL} funkcji H_{SL} podany



Rys. B.1. Schemat blokowy programu do obliczania odpowiedzi impulsowej na podstawie modułu funkcji przejścia

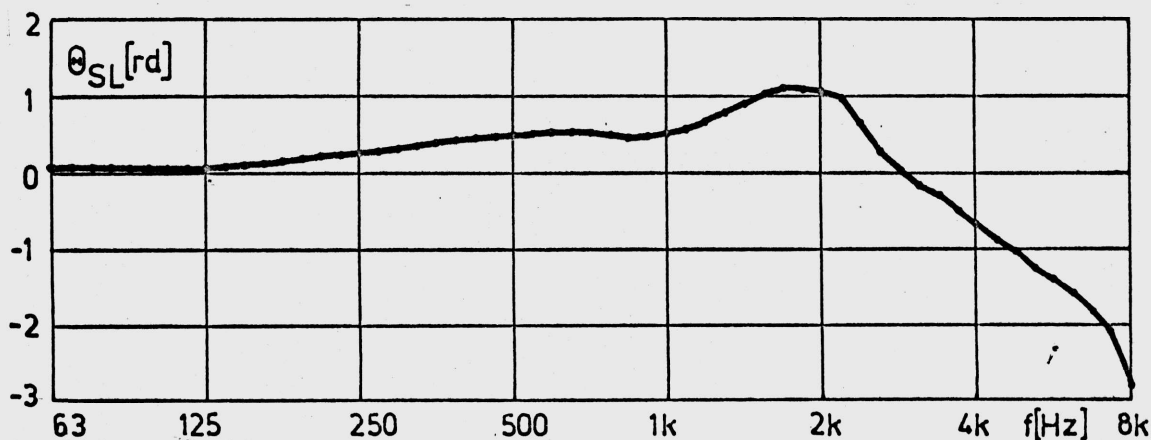


Rys. B.2. Moduły funkcji przejścia H_{SL} zewnętrznego systemu słuchowego podane przez Shawa [56]

w skali logarytmicznej, związane z nim opóźnienie czasowe

$T_{SL} = \Theta_{SL}/2\pi f$ oraz odpowiedź impulsową h_{SL} . Liczono 1024 punkty odpowiedzi impulsowej dla odstępu próbkowania $\Delta = 50 \mu s$, co daje czas ok. 50 ms. Odpowiedź impulsowa h_{SL} zapisywana była również na dysku z przeznaczeniem do dalszego przetwarzania.

Dla przykładu, na rys. B.3 przedstawiono wykres argumentu funkcji H_{SL} dla kąta $\alpha = -30^\circ$.

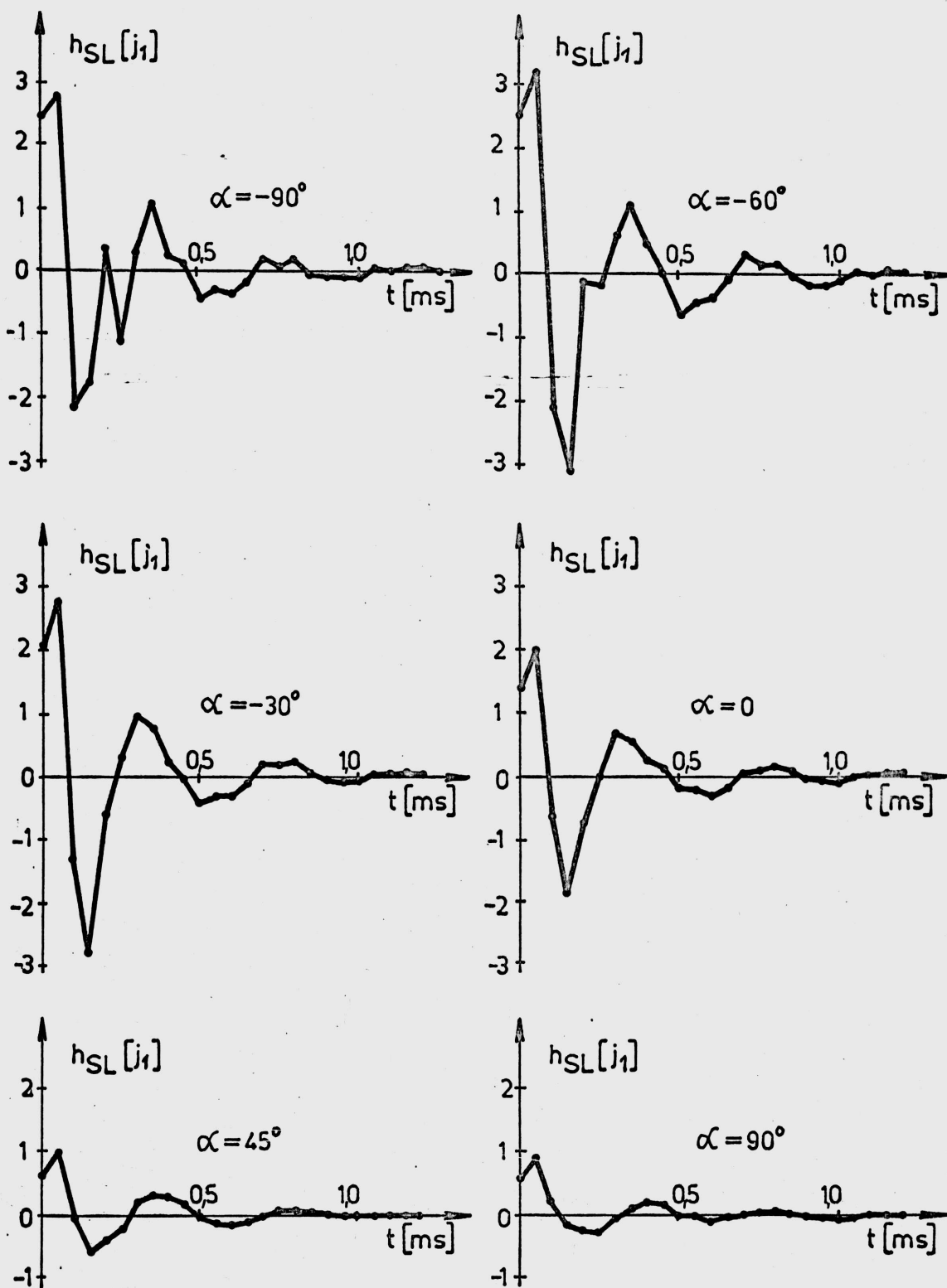


Rys. B.3. Argument funkcji H_{SL} dla kąta $\alpha = -30^\circ$

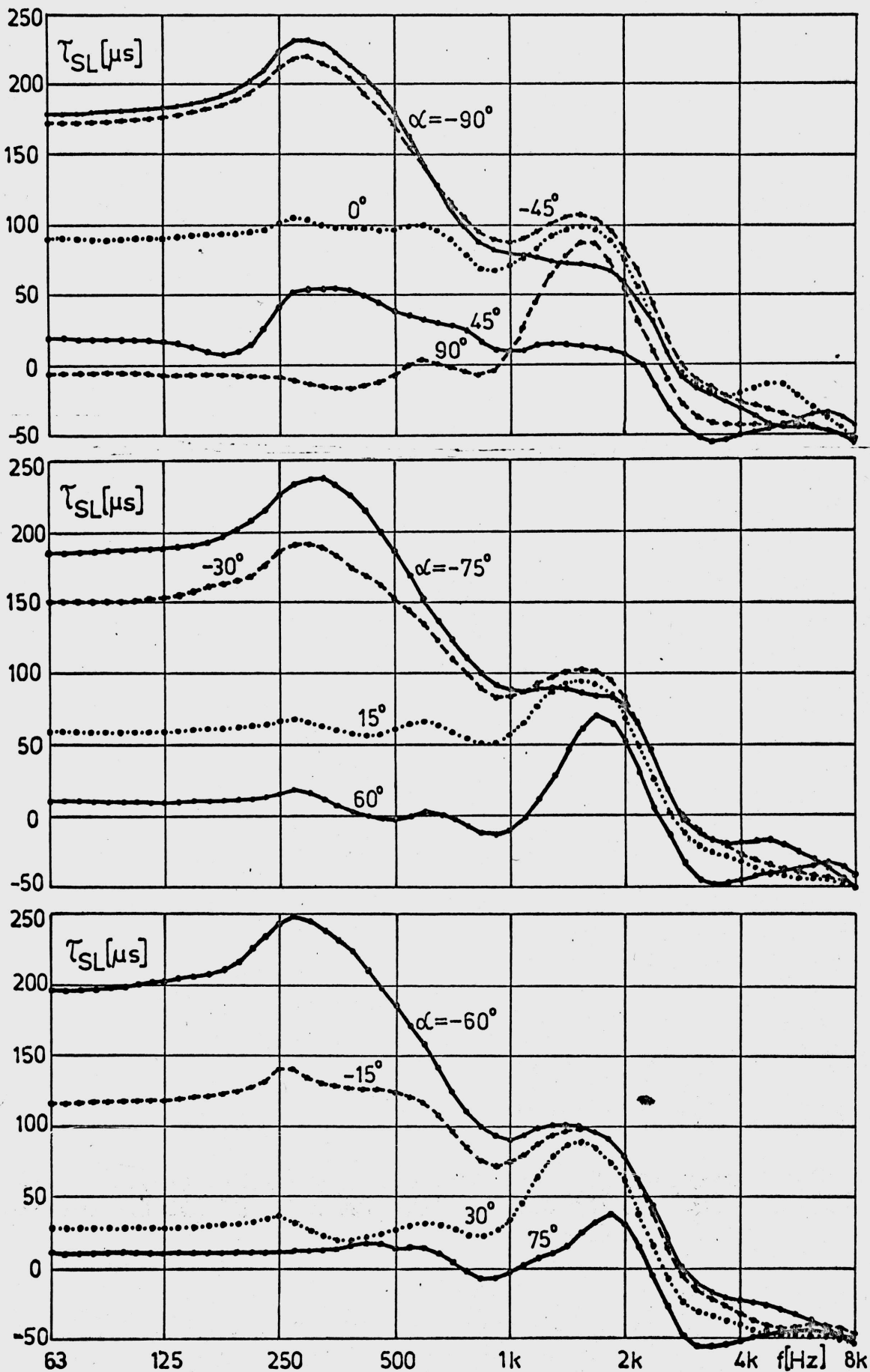
Na rys. B.4 przedstawiono przykładowe wykresy odpowiedzi impulsowych h_{SL} , obliczonych za pomocą programu. Na wykresach tych przedstawiono tylko początkowe fragmenty odpowiedzi impulsowych. Wartości funkcji h_{SL} ze wzrostem czasu szybko maleją do zera.

Ponieważ założono symetrię zewnętrznego systemu słuchowego /patrz rozdz. 2.4/, znając odpowiedzi impulsowe $h_{SL}(t, \alpha)$ można określić odpowiednie odpowiedzi impulsowe dla prawego ucha, tzn. $h_{SP}(t, \alpha)$. Zachodzi bowiem związek: $h_{SP}(t, \alpha) = h_{SL}(t, -\alpha)$.

Na rys. B.5 przedstawiono wykresy przesunięcia czasowego τ_{SL} związanego z argumentem θ_{SL} funkcji H_{SL} . Zależności τ_{SL} posłużyły w rozdz. 5 do określenia międzyusznego opóźnienia czasowego C_S^B .



Rys. B.4. Przykładowe odpowiedzi impulsowe $h_{SL}(t, \alpha)$



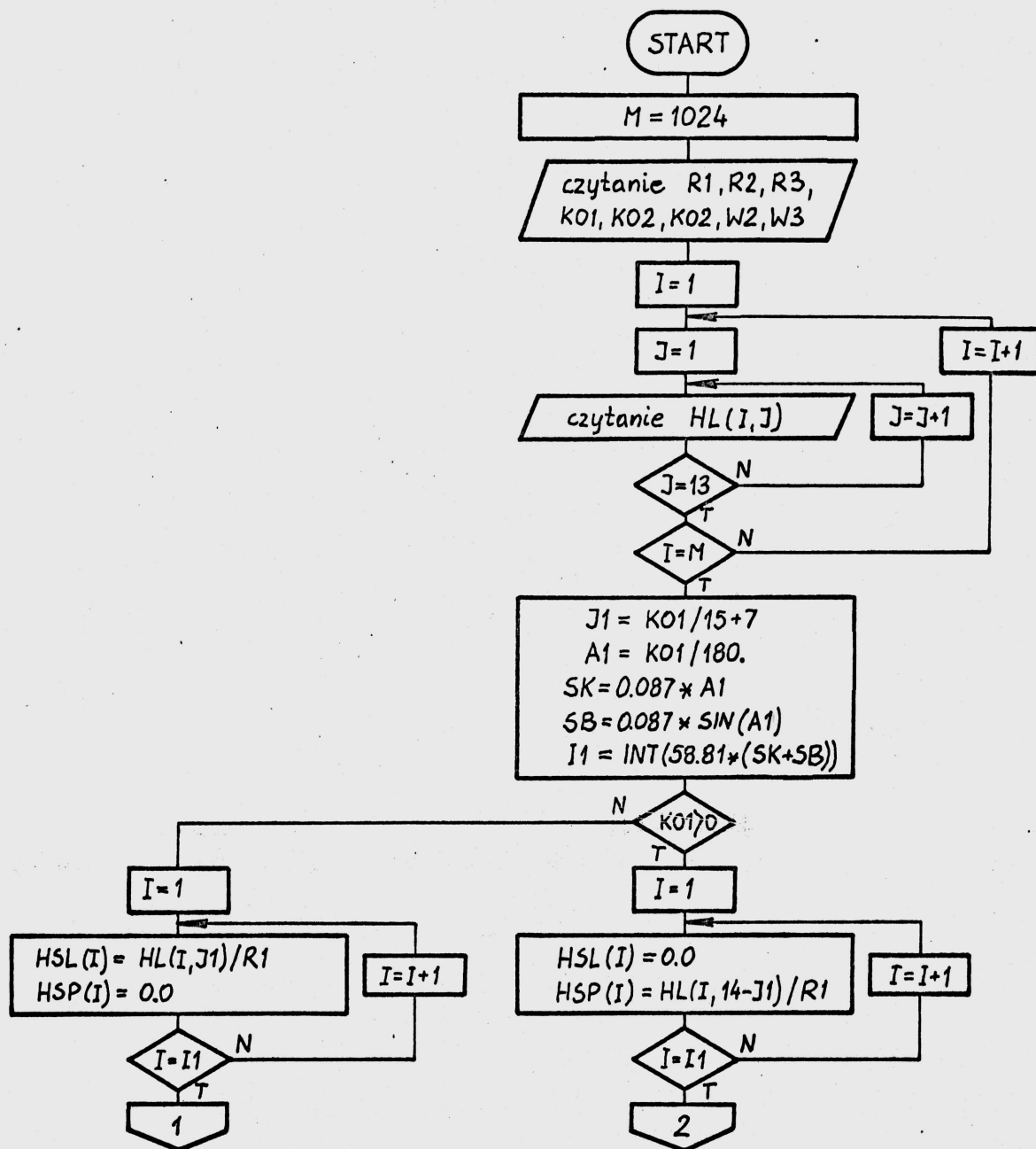
Rys. B.5. Przesunięcie czasowe $\tau_{SL}(f, \alpha)$

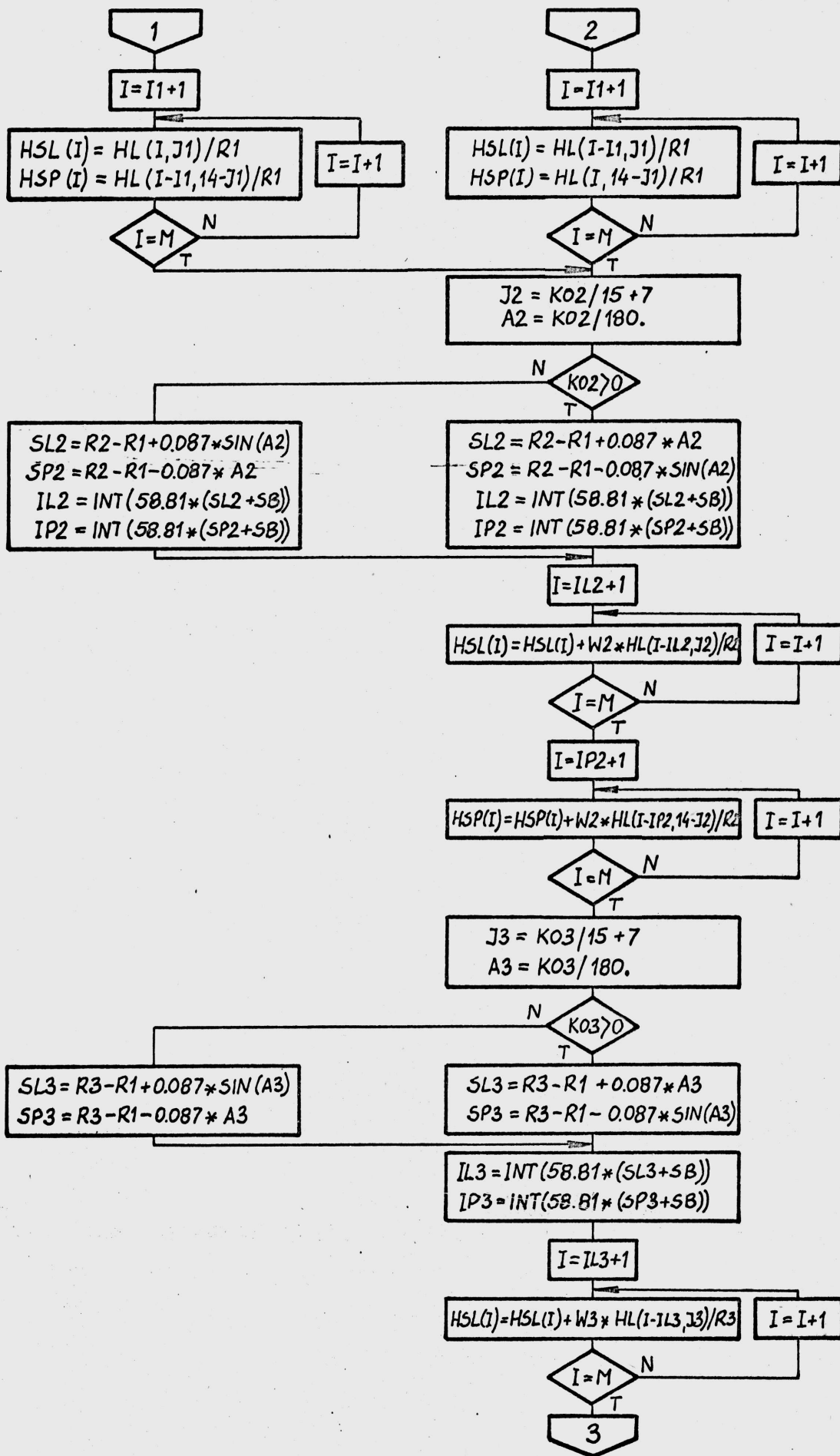
Dodatek C

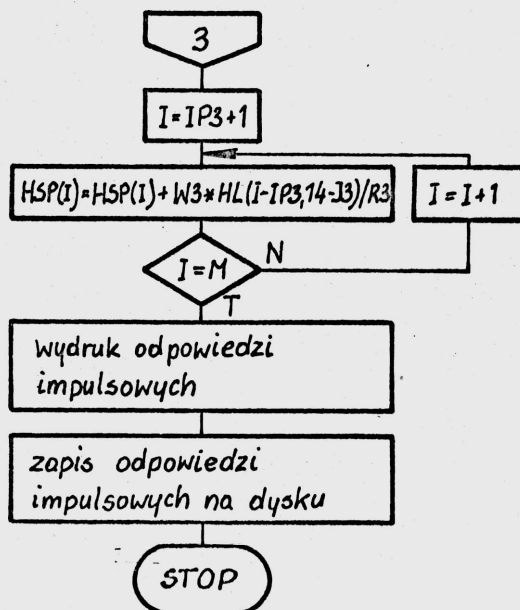
SCHEMATY BLOKOWE I OPISY PROGRAMÓW

1. Program do obliczania odpowiedzi impulsowych ${}^2h_{SL}$ i ${}^2h_{SP}$.

Schemat blokowy programu przedstawiono na rys. C.1.







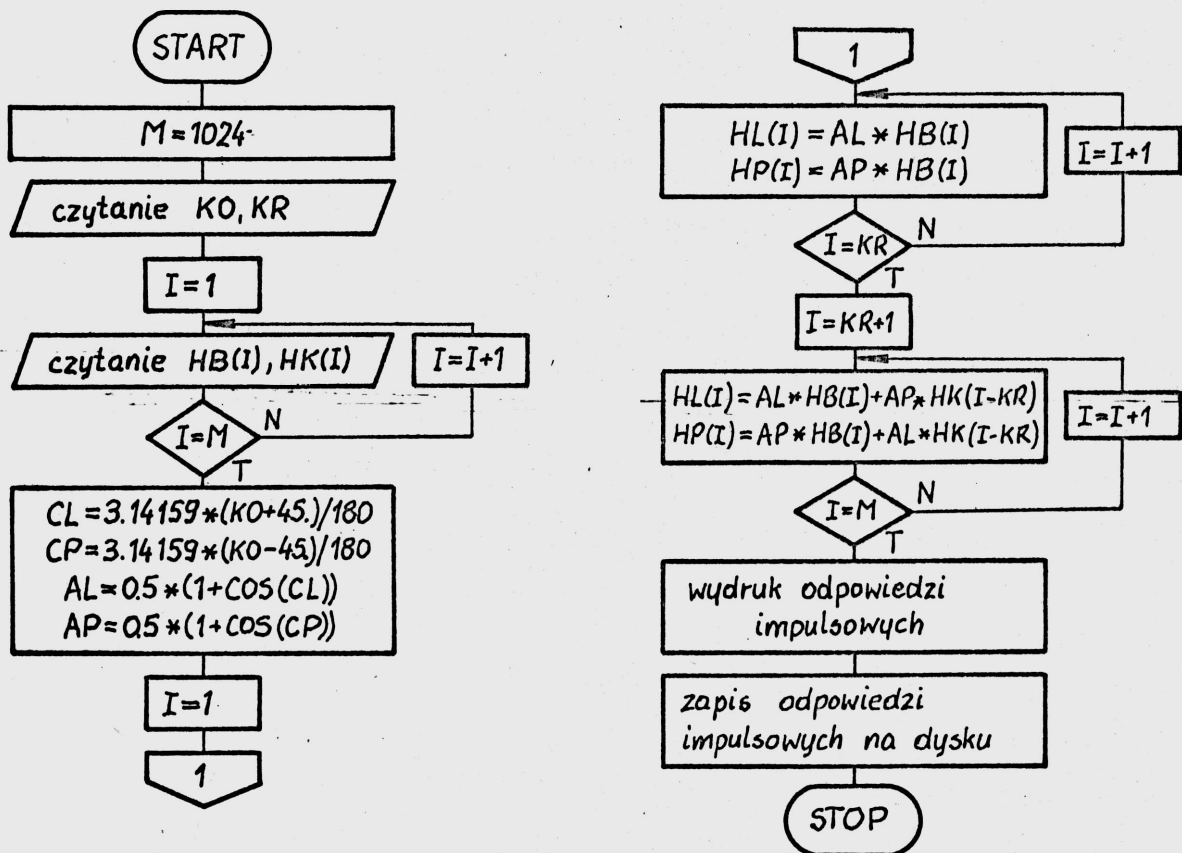
Rys. C.1. Schemat blokowy programu do obliczania odpowiedzi impulsowych ${}^2h_{SL}$ i ${}^2h_{SP}$

Danymi wejściowymi do programu są: odległości r , r_2 i r_3 oznaczone jako $R1$, $R2$ i $R3$, kąty α , α_1 i α_2 oznaczone jako $K01$, $K02$ i $K03$, współczynniki odbicia K_{21} i K_{31} oznaczone jako $W2$ i $W3$ oraz zbiór odpowiedzi impulsowych $h_{SL}(t, \alpha)$ opisujących zewnętrzny system słuchowy a oznaczony przez $HL(I, J)$. Tablicę $HL(I, J)$ wczytywano z dysku. W tablicy $HL(I, J)$ zmienna I oznacza czas, a zmienna J kąt α . Dla $J = 1$, $\alpha = -90^\circ$. Zwiększenie indeksu J o jeden odpowiada zwiększeniu kąta α o 15° . Nie wczytywano odpowiedzi impulsowych $h_{SP}(t, \alpha)$ gdyż, $h_{SP}(t, \alpha) = h_{SL}(t, -\alpha)$.

Z programu wyprowadzono odpowiedzi impulsowe ${}^2h_{SL}(t)$ i ${}^2h_{SP}(t)$ oznaczone jako $HSL(I)$ i $HSP(I)$. Odpowiedzi ${}^2h_{SL}$ i ${}^2h_{SP}$ zapisywano również na dysku z przeznaczeniem do dalszego przetwarzania.

2. Program do obliczania odpowiedzi impulsowych ${}^1h_{NL}$ i ${}^1h_{NP}$

Schemat blokowy programu przedstawiono na rys. C.2.



Rys. C.2. Schemat blokowy programu do obliczania odpowiedzi impulsowych ${}^1h_{NL}$ i ${}^1h_{NP}$

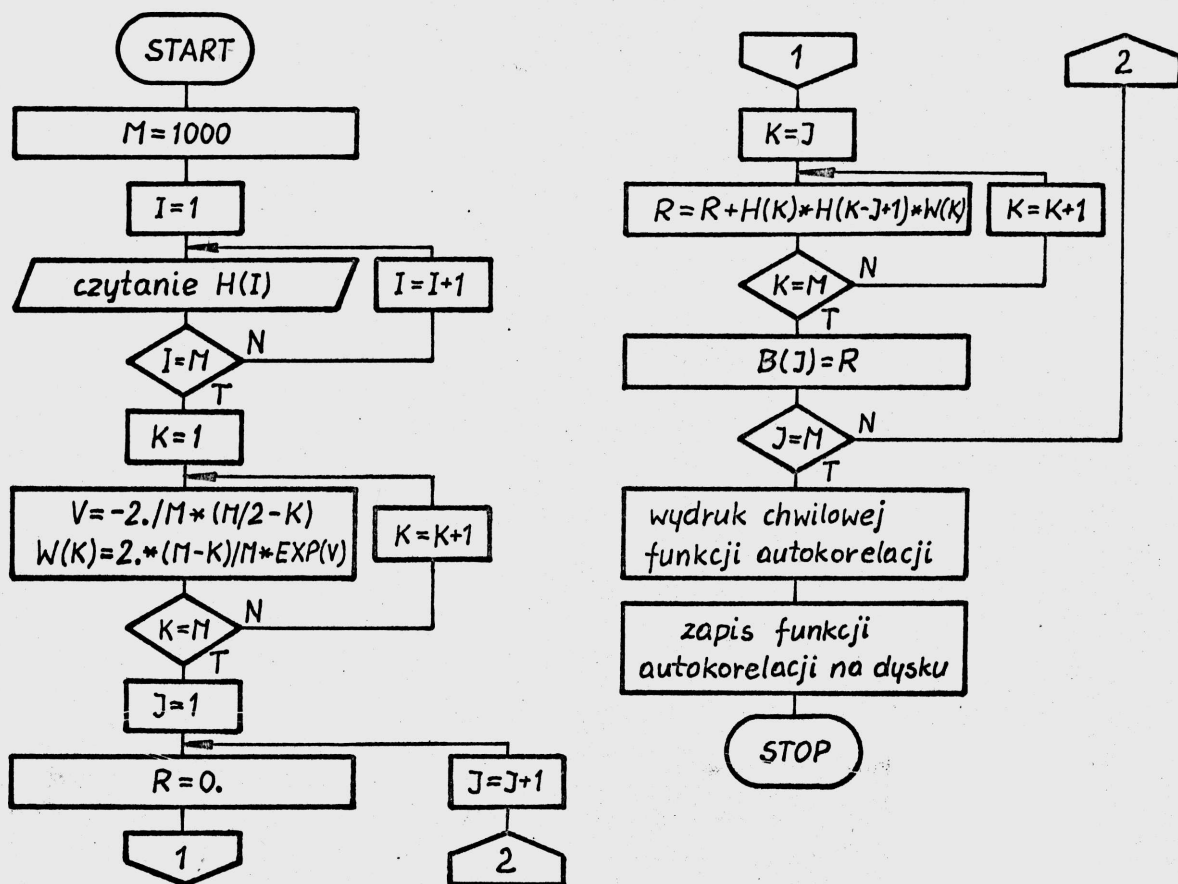
Danymi wejściowymi do programu są: kąt φ oznaczony jako KO, opóźnienie czasowe ${}^b\tau_2$ pomiędzy sygnałami docierającymi do lewego i prawego ucha wyrażone w czasie dyskretnym a oznaczone jako KR oraz odpowiednie odpowiedzi impulsowe $h_{SL}(t)$ i $h_{SP}(t)$ oznaczone przez HB(I) i HK(I). HB(I) opisuje przejście sygnału od źródła dźwięku do bliższego ucha słuchacza, a HK(I) - do dalszego ucha. Do programu wprowadzono obliczone programem przedstawionym w dodatku B odpowiedzi impulsowe h_{SL} dla kątów $\alpha = -45^\circ$ i $\alpha = 45^\circ$ dla przypadku gdy kąt rozstawienia głośników wynosi 90° lub dla kątów $\alpha = -30^\circ$ i $\alpha = 30^\circ$ dla

przypadku $2\theta = 60^\circ$. W przedstawionym na rys. C.2 programie zadane są kardoidalne charakterystyki kierunkowości mikrofonów.

Z programu wyprowadzono odpowiedzi impulsowe $h_{NL}(t)$ i $h_{NP}(t)$ oznaczone jako $HL(I)$ i $HP(I)$. Odpowiedzi impulsowe h_{NL} i h_{NP} zapisywano również na dysku z przeznaczeniem do dalszego przetwarzania.

3. Program do obliczania chwilowej funkcji autokorelacji na podstawie odpowiedzi impulsowej $h(t)$

Schemat blokowy programu przedstawiono na rys. C.3.



Rys. C.3. Schemat blokowy programu do obliczania chwilowej funkcji autokorelacji $B(\tau)$ na podstawie odpowiedzi impulsowej $h(t)$

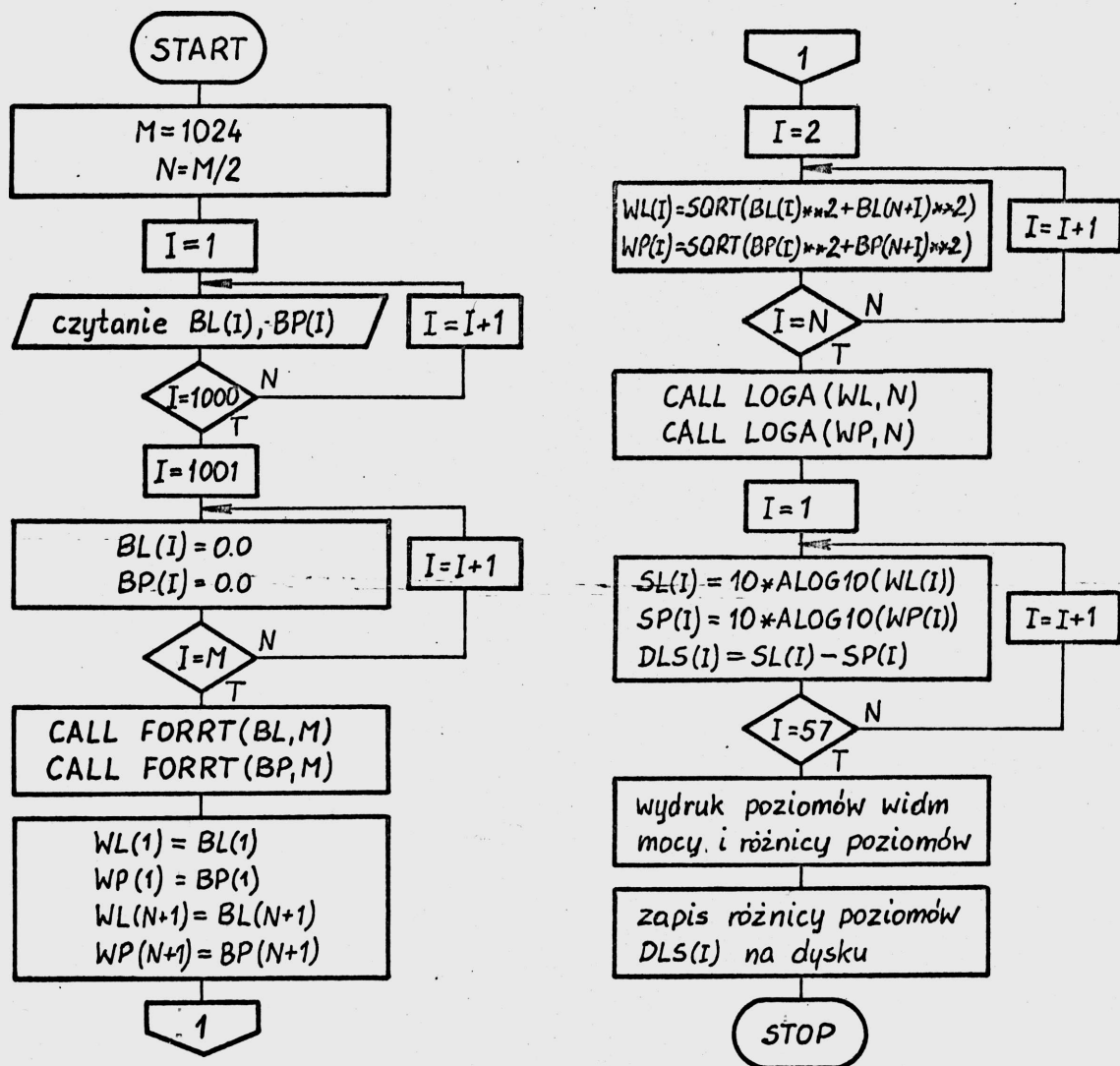
Danymi wejściowymi do programu są wartości opisujące odpowiedź impulsową $h(t)$ oznaczoną jako $H(I)$. Odpowiedź impulsowa $h(t)$ może być dowolną odpowiedzią impulsową opisującą przejście sygnału od źródła dźwięku do lewego lub prawego ucha słuchacza, zgodnie z modelem przedstawionym na rys. 2.2. Wykonano obliczenia dla zbiorów odpowiedzi impulsowych $^1h_{SL}$, $^1h_{SP}$, $^2h_{SL}$, $^2h_{SP}$, $^1h_{NL}$ i $^1h_{NP}$. W wyniku otrzymywano chwilową funkcję autokorelacji $B(\tau)$ sygnału docierającego do lewego lub prawego ucha słuchacza, przy czym wynik ten słuszny jest dla przyjętego w rozdz. 4.4 sygnału emitowanego przez źródło dźwięku.

Z programu wyprowadzano chwilową funkcję autokorelacji $B(\tau)$ oznaczoną jako $B(J)$.

4. Program do obliczania poziomów chwilowych widm mocy L_{SL} i L_{SP} oraz różnicy poziomów ΔL_S

Schemat blokowy programu przedstawiono na rys. C.4. Danymi wejściowymi są chwilowe funkcje autokorelacji $B_L(\tau)$ i $B_P(\tau)$ sygnałów docierających do lewego i prawego ucha słuchacza oznaczone jako $BL(I)$ i $BP(I)$. W programie występują podprogram FORRT realizujący prostą transformatę Fouriera a podany przez Monro [37, 38] oraz podprogram LOGA. Podprogram LOGA(W,N) służy do przeliczania widma z liniowej skali częstotliwości na logarytmiczną skalę częstotliwości.

Z programu wyprowadzano poziomy chwilowych widm mocy $L_{SL}(f)$ i $L_{SP}(f)$ oznaczone jako $SL(I)$ i $SP(I)$ oraz różnicę poziomów $\Delta L_S(f)$ a oznaczoną przez $DLS(I)$. Każda z tych funkcji dana jest w logarytmicznej skali częstotliwości co 1/8 oktawy. Pierwsze wartości odpowiadają częstotliwości $f = 63$ Hz a ostatnie - $f = 8$ kHz.



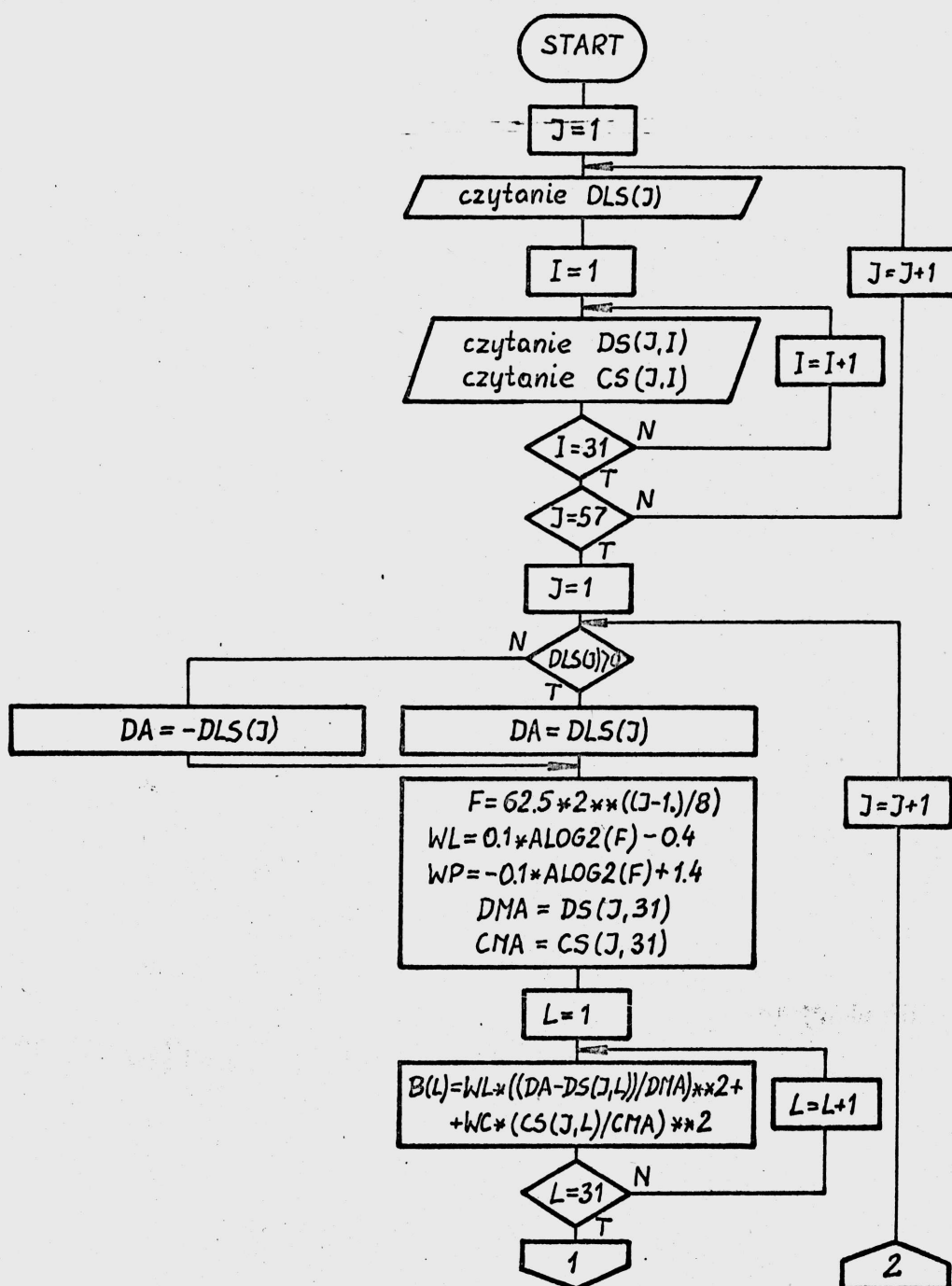
Rys. C.4. Schemat blokowy programu do obliczania poziomów chwilowych widm mocy L_{SL} i L_{SP} oraz różnicy poziomów ΔL_S

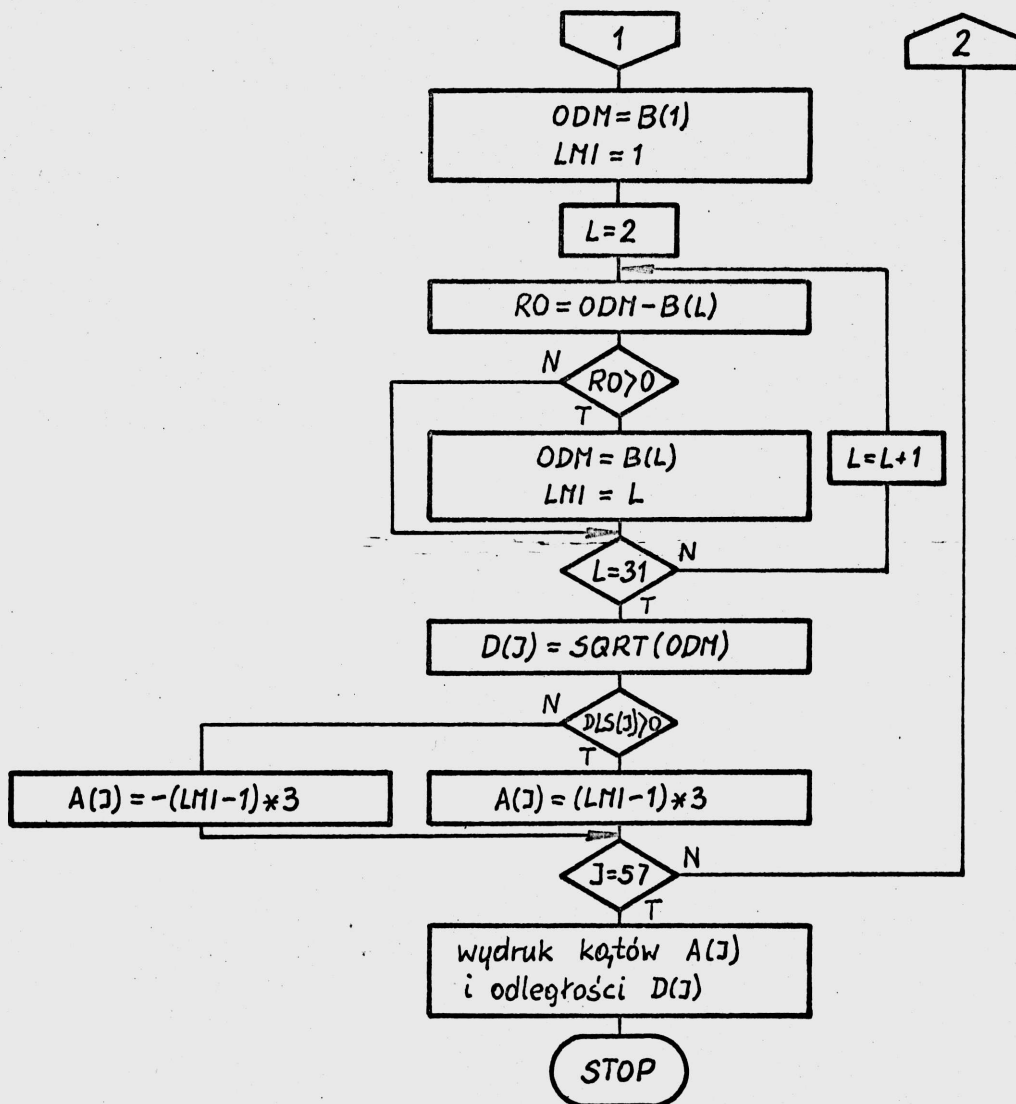
5. Program do obliczania kątów α_k i odległości d_k

Schemat blokowy programu przedstawiono na rys. C.5. Danymi wejściowymi do programu są: dana różnica poziomów $\Delta L_S(f)$ oznaczona jako $DLS(J)$ oraz zbiór $\mathcal{K}$ określony przez zależność różnicy poziomów ΔL_S^B i opóźnienia czasowego C_S^B od częstotliwości i kąta α . $\Delta L_S^B(f, \alpha)$ w programie reprezentowana jest przez $DS(J, I)$, a $C_S^B(f, \alpha)$ przez $CS(J, I)$. Dla $I = 1$, $\alpha = 0^\circ$. Wzrost I o jeden oznacza wzrost kąta α o 3° . $DLS(J)$ oznacza różnicę

poziomów wytworzoną przez sygnały dla dowolnego sposobu odbioru. Dla wszystkich wielkości występujących w programie, zmienna J oznacza częstotliwość. Dla $J = 1$, $f = 63$ Hz a dla $J = 57$, $f = 8$ kHz. Wzrost J o jeden oznacza wzrost częstotliwości o $1/8$ oktawy.

Wielkościami wyjściowymi z programu są: kąty α_k oznaczone przez $C(J)$ oraz odległości d_k oznaczone przez $D(J)$.





Rys. C.5. Schemat blokowy programu do obliczania kątów α_k i odległości d_k

Bibliografia

- [1] Abbagnaro L.A., Bauer B.B., Torick E.L.: Measurements of diffraction and interaural delay of a progressive sound wave caused by the human head. II, JASA, vol.58, no.3, 1975
- [2] Acroyd M.H.: Short-time spectra and time frequency energy distributions, JASA, vol.50, no.5, 1971
- [3] Allen J.B.: Short term spectral analysis, synthesis and modification by discrete Fourier transform, IEEE Trans. Acoustics, Speech, Signal Proc., vol.ASSP 25, no.3, 1977
- [4] Bauer B.B., Torick E.L.: Diffraction and interaural delay of a progressive sound wave caused by the human head, JASA, vol.36, no.6, 1964
- [5] Bernfeld B., Smith B.: Computer-aided model of stereofonic systems, 59th Convention AES, Hamburg, 1978
- [6] Blauert J.: Sound localization in the median plane, Acustica, vol.22, no.4, 1969/70
- [7] Blauert J.: Räumliches hören, S.Hirzel Verlag, Stuttgart, 1974
- [8] Bracewell R.: Przekształcenie Fouriera i jego zastosowania, WNT, Warszawa, 1975
- [9] Butler R.A.: The effect of hearing impairment on locating sound in the vertical plane, Int. Audiol., vol.9, no.1, 1970
- [10] Charkiewicz A.A.: Liniejnyje i nieliniejnyje sistemy, Izdatelstvo "Nauka", Moskva, 1973
- [11] Cremer L.: Geometrische Räumakustik, S.Hirzel Verlag, Stuttgart, 1961
- [12] De Boer K.: Plastische Klangwiedergabe, Philips techn. Rdsch, 5, 1940
- [13] Dirks D.D., Gilman S.: Exploring azimuth effects with an anthropometric manekin, JASA, vol.66, no.3, 1979

- [14] Djupesland G., Zwislocki J.J.: Sound pressure distribution in the outer ear, Scand. Audiol., vol.1, 1972
- [15] Duifhuis H.: Consequences of peripheral frequency analysis for nonsimultaneous masking, JASA, vol.54, 1973
- [16] Fano R.M.: Short-time autocorrelation functions and power spectra, JASA, vol.22, no.5, 1950
- [17] Feddersen W.E., Sandel T.T., Teas D.C., Jeffress L.A.: Localization of high-frequency tones, JASA, vol.29, no.9, 1957
- [18] Flanagan J.L.: Speech analysis and perception, Springer Verlag, Berlin, 1965
- [19] Florkowski J.: Wykorzystanie odsłuchu słuchawkowego w badaniach nad lokalizacją źródeł dźwięku metodą minimalnego kąta słyszenia, Prace XXV OSA, Poznań, 1978
- [20] Furdujev V.V.: Akustičeskiye osnovy vieszczania, Sviazizdat, Moskva, 1960
- [21] Furdujev V.V.: Priroda stereofoničeskovo efekta, Technika Kina i Televidenia, no.2, 1967
- [22] Furdujev V.V.: Stereofonia i mnogokanalnyje zvukovyje sistemy, Energia, Moskva, 1973
- [23] Gardner M.B.: Some monaural and binaural factors of median plane localization, JASA, vol.54, 1973
- [24] Hass H.: Uber den Einfluss eines Einfachachos auf die Hörsamkeit von Sprache, Acoustica, vol.1, 1951
- [25] Hanning G.B.: Detectability of interaural delay in high-frequency complex waveforms, JASA, vol.55, no.1, 1974
- [26] Hanning G.B.: Lateralization and the binaural masking-level difference, JASA, vol.55, 1974
- [27] Kudrewicz J.: Analiza funkcjonalna dla automatyków i elektroników, PWN, Warszawa, 1976
- [28] Leackey D.M., Sayers B.McA, Cherry C.: Binaural fusion of low- and high-frequency sounds, JASA, vol.30, no.3, 1958
- [29] Leackey D.M.: Some measurements the effects of interchannel intensity and time differences in two channel sound system, JASA, vol.31, no.7, 1959
- [30] Levin B.R.: Teoreticeskiye osnovy statisticeskoj radiotech-

niki, Sovietskoje radio, Moskva, 1974

- [31] Lochner J.P.A., Burger J.F.: The subjective masking of short time delayed echoes by their primary sounds and their contribution to the intelligibility of speech, *Acoustica*, vol.8, no.1, 1958
- [32] Mc Fadden D., Pasanen E.G.: Lateralization at high-frequencies based on interaural time differences, *JASA*, vol.59, no.3, 1976
- [33] Mehrgard S., Mellert V.: Transformation characteristics of the external human ear, *JASA*, vol.61, no.6, 1977
- [34] Mills A.W.: On the minimum audible angle, *JASA*, vol.30, no.4, 1958
- [35] Miszczak S.: *Elektroakustyka*, WKiŁ, Warszawa, 1969
- [36] Miszczak S.: *Zakłócenia odbiciowe w przestrzeni ograniczonej*, Zeszyty Naukowe COBR RTv, Warszawa, 1977
- [37] Monro D.M.: Complex discrete fast Fourier transform, *Applied Statistics*, vol.24, no.1, 1975
- [38] Monro D.M.: Real discrete fast Fourier transform, *Applied Statistics*, vol.25, no.2, 1976
- [39] Niese H.: Die Messung der Nutzschall- und Echogradverteilung zur Beurteilung der Hörsamkeit in Räumen, *Acoustica*, vol.11, no.3, 1961
- [40] Niewiadomski T.: Modele eksperymentalnej analizy widmowej sygnału w czasie rzeczywistym, *Referaty Inst. Telekomunikacji Pol. Warsz.*, Zeszyt 70, Warszawa, 1979
- [41] Oppenheim A.V., Schafer R.W.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*, WKiŁ, Warszawa, 1979
- [42] Papoulis A.: *Prawdopodobieństwo, zmienne losowe i procesy stochastyczne*, WNT, Warszawa, 1972
- [43] Penner M.J.: Detection of temporal gaps in noise as a measure of the rate of decay of auditory sensation, *JASA*, vol.61, no.2, 1977
- [44] Penner M.J.: A power law transformation resulting in a class of short-term integrators that produce time-intensity trades for noise bursts, *JASA*, vol.63, no.1, 1978

- [45] Penner M.J.: Forward masking with equal-energy maskers, JASA, vol.66, no.6, 1979
- [46] Praca zbiorowa: Poradnik inżyniera, matematyka, WNT, Warszawa, 1971
- [47] Robinson C.E., Pollack J.: Interaction between forward and backward masking: a measure of the integrating period of the auditory system, JASA, vol.53, no.5, 1973
- [48] Roffler S., Butler R.A.: Factors that influence the localization of sound in the vertical plane, JASA, vol.43, no.6, 1968
- [49] Rolewicz S.: Analiza funkcjonalna i teoria sterowania, PWN, Warszawa, 1977
- [50] Ryffert H.: Metody analizy widmowej niestacjonarnych przebiegów akustycznych, Biuletyn PTPN, IX, Seria B, zeszyt 2, 1961
- [51] Schroeder M.R., Atal B.S.: Generalized short-time power spectra and autocorrelation function, JASA, vol.34, no.11, 1962
- [52] Searle C.L., Braida L.D., Cuddy D.R., Davis M.F.: Binaural pinna disparity: another auditory localization cue, JASA, vol.57, no.2, 1975
- [53] Searle C.L., Braida L.D., Davis M.F., Colburn H.S.: Model for auditory localization, JASA, vol.60, no.5, 1976
- [54] Shaw E.A.G.: Earcanal pressure generated by a free sound field, JASA, vol.39, no.3, 1966
- [55] Shaw E.A.G.: Sound pressure transformation from the free-field to the eardrum, JASA, vol.53, 1973
- [56] Shaw E.A.G.: Transformation of sound pressure level from the free field to the eardrum in the horizontal plane, JASA, vol.56, no.6, 1974
- [57] Shaw E.A.G., Teranishi R.: Sound pressure generated in an external-ear replica and real human ears by a nearby point source, JASA, vol.44, no.1, 1968
- [58] Snow W.B.: Effects of arrival time on stereophonic localization, JASA, vol.26, no.6, 1954

- [59] Sobolewski J.: Badanie probalistycznych charakterystyk sygnału fonicznego, Prace Naukowe Instytut. Telekomunikacji i Akustyki Pol. Wrocław., Raport nr I-28/PRE-105/79, Wrocław, 1979
- [60] Thomas M.V.: Improving the stereo headphone sound image, JAES, vol.25, no.7/8, 1977
- [61] Wendt K.: Das Richtungshören bei Zweikanal-Stereophonie, Rundfunktechn. Mitt., vol.8, 1964
- [62] Whitworth R.M., Jeffress L.A.: Time versus intensity in the localization of tones, JASA, vol.18, no.4, 1961
- [63] Wiener F.M.: On the diffraction of a progressive sound wave by the human head, JASA, vol.19, no.1, 1947
- [64] Wiener F.M., Ross D.A.: The pressure distribution in the auditory canal in a progressive sound field, JASA, vol.18, no.2, 1961
- [65] Winckel F.: Osobliwości słyszenia muzycznego, PWN, Warszawa, 1965
- [66] Wojnar A.: Teoria sygnałów, WNT, Warszawa, 1980
- [67] Wright D., Hebrank J., Wilson B.: Pinna reflections as cues for localization, JASA, vol.56, no.3, 1974
- [68] Żyszkowski Z.: Podstawy elektroakustyki, WNT, Warszawa, 1965

OBJECTIVE EVALUATION OF A SOUND-IMAGE LOCALIZATION EFFECT IN TWO-CHANNEL LOUDSPEAKER INTENSITY STEREO-SYSTEM

It is well-known, that classically used psychoacoustical measurements for the localization effect evaluation in the stereo sound-system are time-consuming and in some cases their results may be dubious. To avoid these inconveniences, in the paper, a new method of localization effect evaluation has been proposed.

The method results from the analysis of parameters of input signals to the left and right listener's eardrum. First, the mathematical models of hearing in case of the direct as well as two-channel loudspeaker intensity stereo-system sound reproduction have been proposed, in which the impulse responses describing the listener external aural system, are of particular importance. These impulse responses have been computed using the absolute values of transfer functions given by Shaw, by means of Hilbert transform. Then, assuming that the sound-source signal as well as the input signals to the left and right ear are non-stationary random signals, two-dimensional autocorrelation functions of these signals have been computed. Consequently, the models proposed are more accurate in comparison with the ones used by other authors.

Next, the classical psychoacoustical measurements sound localization cues have been generalized and re-defined within the framework of the correlation theory. These are: the levels of

short-term power spectra, the interaural difference of levels of short-term power spectra and the interaural time delay, which display the properties of an aural system. The new localization cues depend on frequency, time and many other factors describing the stereo-system and a position of a sound-source in relation to a listener or a microphone.

Using the results computed in direct hearing, a decision model has been proposed using a trajectory lying in a four-dimensional space whose coordinates are: interaural difference of levels, interaural time delay, frequency and the angle of the sound-source position in relation to listener. Next, the distance measure in relation to this trajectory has been defined. Minimalizing the distance measure yields the value of a sound-image position angle and the measure of naturalness of localization sensation as well.

Finally, the evaluation of two-channel loudspeaker intensity stereo-system has been performed using the method proposed. The evaluation results are as follows: the sound-image is dispersed, low-frequency sources are localized near of the middle of the base, the sound-image moves along the base if its spectrum varies, localization sensation is not natural. Consequently, the method proposed provides results conformable with the psycho-acoustical measurements, whereas giving a more accurate description of the localization effect.

Lista odbiorców:

1. Ośrodek Informacji Naukowo-Technicznej I-28 Politechniki Wrocławskiej	1
2. Biblioteka Główna Politechniki Wrocławskiej	1
3. Biblioteka Główna Politechniki Warszawskiej	1
4. Biblioteka Główna Politechniki Gdańskiej	1
5. Promotor	1
6. Recenzenci	2
7. Egzemplarze autorskie	4

Razem 11

