

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації
(повна назва)

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Методи просторової обробки сигналів
при зведенні музичних композицій.
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи СТМм-22-2
Шумихин В.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Системи, технології і
комп'ютерні засоби мультимедіа
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Іванова О.О.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Володимир КАРТАШОВ
(підпис)

2023 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 171 Електроніка

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Системи, технології і комп'ютерні засоби мультимедіа

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту Шумихіну Василю Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи просторової обробки сигналів при зведенні музичних композицій.

затверджена наказом по університету від " 20 " 11 2023 р. № 1371 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10.01.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Визначити явища, що беруть участь в формуванні просторового сприйняття звуку людиною. Виявити фактори і параметри звукових сигналів, що впливають на місцеположення віртуального джерела звуку: ширину (азимут); висоту (кут місця); глибину (відстань). Провести теоретичний аналіз методів обробки для позиціонування окремих треків композиції в просторі. Визначити найбільш дієві обробки, їх можливості і обмеження. Запропонувати конкретні методи прийоми просторової обробки звуку при зведенні і майстерингу. Особливу увагу приділити моносумісності просторових обробок.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Вступ

1 Аналіз передумов і механізмів для введення просторової обробки звукових сигналів.

2 Теоретичний аналіз методів просторової обробки в зведенні і майстерингу звуку.

3 Практичні прийоми просторової обробки при зведенні і майстерингу.

Висновки

Перелік посилань

Додатки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням обов'язкових креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

1. Актуальність задачі (1 слайд).
2. Мета роботи (1 слайд).
3. Локалізація по часовій різниці ITD (1 слайд).
4. Локалізація по різниці інтенсивностей IID (1 слайд).
5. Локалізація по спектральним відмінностям ISD (1 слайд).
6. Вертикальна локалізація (1 слайд).
7. Глибинна локалізація звуку (1 слайд).
8. Методи позиціонування (1 слайд).
9. Позиціонування по ширині (1 слайд).
10. Фазова затримка і detune (1 слайд).
11. Позиціонування джерела по висоті (1 слайд).
12. Позиціонування джерела по глибині (1 слайд).
13. Широкий звук при записі (1 слайд).
14. Розширення стерео ефектом Хааса (1 слайд).
15. Розширення стерео розлаштуванням тону (1 слайд).
16. Розширення стерео еквалізацією (1 слайд).
17. Mid-side обробка (1 слайд).
18. Висновки (1 слайд).

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	25.09.23–01.10.23	
2	Теоретичний аналіз просторової обробки	02.10.23–11.10.23	
3	Розробка практичних прийомів обробки	12.10.23–10.11.23	
4	Синтез алгоритмів обробки	11.11.23–03.12.23	
5	Експериментальне дослідження алгоритмів	04.12.23–17.12.23	
6	Графічна частина роботи	18.12.23–17.12.23	
7	Перевірка керівником	18.12.23–30.12.23	
8	Перевірка на академічний плагіат	02.01.24–05.01.24	
9	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	06.01.24–09.01.24	

Дата видачі завдання _____ 25.09.2023 р. _____

Студент _____  _____ Василь ШУМИХИН _____
(підпис)

Керівник роботи _____  _____ Олена ІВАНОВА _____
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 65 сторінок, 39 рисунків, 1 таблиця, 36 джерел.

АЗИМУТ, ВИСОТА, ДЖЕРЕЛО, ЕКВАЛІЗАЦІЯ, ЕФЕКТ ХААСА, ЗАТРИМКА, ЗВУК, МОНО, ПОЗИЦІОНУВАННЯ, РЕВЕРБЕРАЦІЯ, СТЕРЕО

Метою кваліфікаційної роботи є аналіз методів і прийомів просторової обробки звукових треків при зведенні і майстерингу звуку і формулювання рекомендацій з просторової обробки для робітників звукової індустрії, студентів та випускників відповідних навчальних закладів.

В роботі визначені явища, що беруть участь в формуванні просторового сприйняття звуку людиною. Показано фактори і параметри звукових сигналів, що впливають на місцеположення віртуального джерела звуку: ширина (ліворуч, праворуч, по центру); висота (вище, нижче); глибина (ближче, далі). Проведено теоретичний аналіз методів обробки для позиціонування окремих треків композиції в просторі. Визначені найбільш дієві обробки, їх можливості і обмеження. детально розібрані конкретні методи прийоми просторової обробки звуку при зведенні і майстерингу. Особливу увагу приділено моносумісності розглянутих обробок.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 65 pages, 39 figures, 1 table, 36 sources.

AZIMUTH, ELEVATION, SOURCE, EQUALIZATION, HAASS EFFECT, DELAY, SOUND, MONO, POSITIONING, REVERBERATION, STEREO

The purpose of the qualification work is the analysis of methods and techniques of spatial processing of sound tracks during sound mixing and mastering and the formulation of recommendations on spatial processing for workers in the sound industry, students and graduates of relevant educational institutions.

The work defines the phenomena involved in the formation of the spatial perception of sound by a person. The factors and parameters of sound signals affecting the location of the virtual sound source are shown: width (left, right, center); height (higher, lower); depth (closer, further). A theoretical analysis of processing methods for positioning individual tracks of the composition in space has been carried out. The most effective treatments, their possibilities and limitations are determined. specific methods and methods of spatial sound processing during mixing and mastering are analyzed in detail. Special attention is paid to the monocompatibility of the considered treatments.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	9
1 АНАЛІЗ ПЕРЕДУМОВ І МЕХАНІЗМІВ ДЛЯ ВВЕДЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ.....	11
1.1 Бінауральний слух людини.....	11
1.2 Просторова локалізація звуку.....	12
1.2.1 Горизонтальна (азимутальна) локалізація.....	13
1.2.2 Локалізація по часовій різниці ITD.....	15
1.2.3 Локалізація по різниці інтенсивностей IID.....	18
1.2.4 Локалізація по спектральним відмінностям ISD.....	20
1.2.5 Вертикальна (висотна) локалізація.....	21
1.3 Глибинна локалізація звуку (оцінка відстані до джерела).....	23
1.4 Загальне просторове враження.....	27
1.5 Висновки по розділу 1.....	29
2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ В ЗВЕДЕННІ І МАЙСТЕРИНГУ ЗВУКУ.....	32
2.1 Позиціонування по ширині.....	32
2.2 Регулювання висоти.....	36
2.3 Регулювання глибини.....	39
2.4 Висновки по розділу 2.....	44
3 ПРАКТИЧНІ ПРИЙОМИ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ ПРИ ЗВЕДЕННІ І МАЙСТЕРИНГУ.....	47
3.1 Створення широкого звуку при записі.....	47
3.2 Розширення стерео ефектом Хааса.....	48
3.3 Розширення стерео розлаштуванням detune.....	50
3.4 Розширення стерео еквалізацією.....	51
3.5 Mid-side обробка.....	52

3.6 Висновки по розділу 3.....	55
Висновки.....	57
Перелік посилань.....	62
ДОДАТКИ.....	66
Додаток А. Графічний матеріал.....	67
Додаток Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....	85

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;
- AIR – Acoustic Impulse Response – імпульсна характеристика приміщення;
- Alcons – articulation loss for consonants – втрати розбірливості;
- ATF – Acoustic Transfer Function – акустична частотна функція передачі;
- DAW – Digital Audio Workstation – цифрова звукова робоча станція;
- DRR – Direct to Reverberation Ratio – відношення прямого до відбитих звуків;
- FFT Fast Fourier Transform – швидке перетворення Фур'є;
- HIGH – високі частоти;
- IFFT – Inverse Fast Fourier Transform – зворотне FFT;
- IID – Interaural Intensity Difference – локалізація по різниці гучності;
- ISD – Interaural Spectral Difference – локалізація по спектральним відмінностям;
- ITD – Interaural Time Difference – локалізація по часовій різниці;
- LOW – низькі частоти;
- Mid – середній – сума лівого і правого каналів фактично є моно сигналом;
- MID – середні частоти;
- PSD – Power Spectral Density – спектральна щільність потужності;
- RMS – Root Mean Square – середньоквадратичний;
- RT – Reverberation Time – час реверберації;
- Side – боковий – є стереофонічною складовою сигналу;
- SNR – Signal to Noise Ratio – відношення сигнал-шум;
- STFT – short-time Fourier transform – віконне перетворення Фур'є.

ВСТУП

Музична спільнота давно експериментує із просторовим звучанням. Просторове аудіо дозволяє сформувати відчуття справді об'ємної сцени, звучання з усіх напрямків чи, навпаки, з якогось одного конкретного. Історія концепції бере початок ще в середині XVI ст. Тоді фламандський композитор Адріан Вілларт популяризував новий стиль хорового співу з розстановкою виконавців з боків церковної зали та їх поперемінним включенням. У результаті музика «обволікала» парафіян з усіх боків.

У середині XX століття досить незвичайні експерименти з об'ємним звуком продовжив піонер у галузі конкретної музики П'єр Шеффер. Для цього він та його колеги зібрали установку із двадцяти динаміків по периметру кімнати, а також розробили підсилювачі для багатоканальної системи відтворення.

Варто зауважити, що в минулому столітті багато музикантів, інженерів та інших діячів працювали з просторовим звуком і в контексті художніх інсталяцій. Наприклад, 1958 року французький архітектор Яніс Ксенакіс організував концептуальний музичний перформанс у павільйоні Філіпс. Він розставив по виставковій залі 20 підсилювачів та 350 динаміків, через які грала «Роème électronique» композитора Едгара Вареза. За задумом автора оформлення інтер'єру нагадувало нутрощі коров'ячого шлунка — він хотів, щоб відвідувачі розчинилися та «перетравилися» разом із музикою. Але щоб послухати «об'ємні» треки сьогодні, необов'язково відвідувати ексцентричні ярмарки.

З просторовим звучанням експериментують окремі муз. колективи. Ще 2017-го американський рок-гурт R.E.M. випустила ре-реліз альбому 1992 «Automatic For The People» у багатовимірному акустичному форматі. Пізніше аналогічні роботи вийшли в Олівії Родріго, Аріани Гранде та Тейлор Свіфт.

У мережі також розвивається напрямок 8D-музики – діджей мікшує трек та створює ефект «переміщення» джерела аудіозапису по кімнаті. Цифра вісім у назві означає, що звук оточує слухача з восьми сторін. На YouTube є безліч каналів з подібними роботами та мільйонами прослуховувань.

Що цікаво, до тренду також підключаються розробники апаратного забезпечення, смартфонів та навушників. Одна з останніх новин, що нарobili шуму в технологічних медіа – партнерство Apple та Dolby, які додали можливість відтворення просторового звуку в AirPods. Хоча тут варто зауважити, що виробники аудіоапаратури раніше випускали пристрої з об'ємним звуком. Одна з найпоширеніших технологій називається THX Spatial Audio, яку ліцензували різні hardware-компанії.

Серед меломанів та продюсерів можна зустріти думку, що об'ємне звучання – це майбутнє поп-музики, і дедалі більше виконавців випускатиме такі треки. Однак поки що їхня бібліотека залишається невеликою.

Отже просторове відчуття відіграє суттєву роль в сприйнятті звукового контенту слухачем. Звукорежисер при зведенні і майстерингу звуку має враховувати всі розглянуті ефекти.

Метою кваліфікаційної роботи є аналіз методів і прийомів просторової обробки звукових треків при зведенні і майстерингу звуку і формулювання рекомендацій з просторової обробки для робітників звукової індустрії, студентів та випускників відповідних навчальних закладів.

1 АНАЛІЗ ПЕРЕДУМОВ І МЕХАНІЗМІВ ДЛЯ ВВЕДЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ

1.1 Бінауральний слух людини

Наявність двох приймачів слуху забезпечує людині можливість сприймати просторовий звуковий світ оцінювати переміщення звукових сигналів у просторі. Інформація, яка надходить на обидва слухові канали, обробляється в периферичній частині слухової системи (піддається спектрально-часовому аналізу) і потім передається у вищі відділи головного мозку, де шляхом порівняння цієї інформації з двох різних каналів формується єдиний просторовий слуховий образ (рис.1.1) [1].

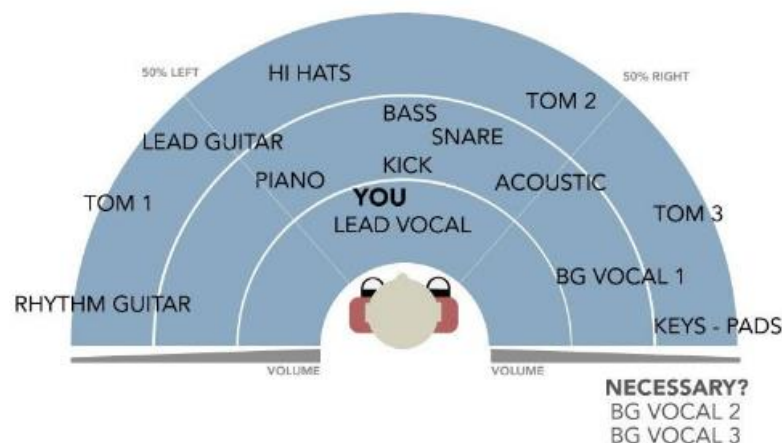


Рисунок 1.1 – Приклад формування просторового звукового образу при прослуховуванні міксу

Сприйняття через два приймача інформації, інакше зване бінауральним слухом, дає людині величезні переваги, основні з яких [2]:

- локалізація сигналів як від одиночних, так і від множинних джерел, що дозволяє формувати просторову перспективу та оцінювати просторове звукове поле (наприклад, у приміщенні);

- поділ сигналів, що надходять від різних звукових джерел з різних точок простору;

– виділення сигналів вибраного звукового джерела і натомість інших звукових сигналів, наприклад виділення прямого звуку і натомість реверберуючих сигналів у приміщенні, виділення мови і натомість шумів тощо.

Аналіз бінауральних слухових ефектів представляє особливий науковий інтерес, зокрема для вивчення функціонування та специфікації півкуль головного мозку, а також величезний практичний інтерес у зв'язку з розвитком та промисловим впровадженням бінауральних технологій для створення систем просторового звукозапису та звуковідтворення (стереофонічні системи, просторові системи типу Dolby та ін), для синтезу тривимірних віртуальних звукових полів (технологія 3D-Sound, техніка ауралізації, створення адаптивних процесорів та ін), для розвитку нових методів метрології та оцінки звукової апаратури.

Забезпечення просторової панорами, роздільності та виділення сигналів на тлі інших сигналів і шумів є найважливішим завданням звукорежисера при записі та обробці звуку, а оскільки це вимагає використання бінауральних властивостей слуху, аналіз цих властивостей і є метою даного розділу.

До основних властивостей бінаурального слуху можна віднести [2]:

- просторову локалізацію,
- ефект попередження,
- бінауральне підсумовування гучності,
- бінауральне демаскування,
- бінауральні биття і злиття звуків щодо висоти, ефекти " правого " і " лівого " вуха при сприйнятті мови та музики та інших.

Почнемо розгляд цих властивостей із просторової локалізації.

1.2 Просторова локалізація звуку

Прослуховуючи звучання симфонічного оркестру в концертному залі (або спів хору у великому соборі), слухач виразно сприймає та розділяє

розташування інструментів у горизонтальній площині на сцені, їхнє розташування по глибині, а також відчуває просторовість навколишнього звукового образу.

Ця здатність і називається просторовою бінауральною локалізацією. Причому механізми локалізації у горизонтальній, вертикальній площині та по глибині дещо різняться.

1.2.1 Горизонтальна (азимутальна) локалізація

На рис. 1.2 представлені розрізняючі ознаки спрямованості при прослуховуванні джерела звуку (наприклад, гучномовця за його різних положень щодо голови слухача) [3].

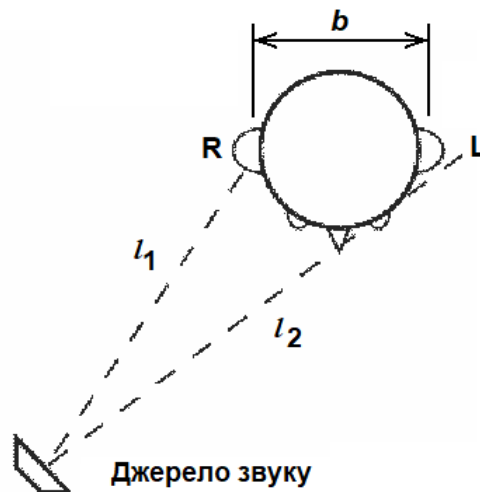


Рисунок 1.2 – Відстань між приймачами звуку (b) і різниця відстаней l_1 і l_2 від джерела до приймачів

Звук, що виходить із гучномовця, розташованого праворуч від слухача, повинен пройти більшу відстань l_2 до лівого вуха, ніж l_1 до правого. Як показано на рис. 1.3, а, низькі звукові частоти (НЧ) мають довжину хвилі більше, ніж діаметр голови, тому вони обгинають голову, надходячи у вуха, розташоване далі (дифракція). Однак звуки високої частоти (ВЧ, рис. 1.3, б) мають довжину хвилі менше, ніж діаметр голови, тому вони блокуються на шляху до лівого вуха [4].

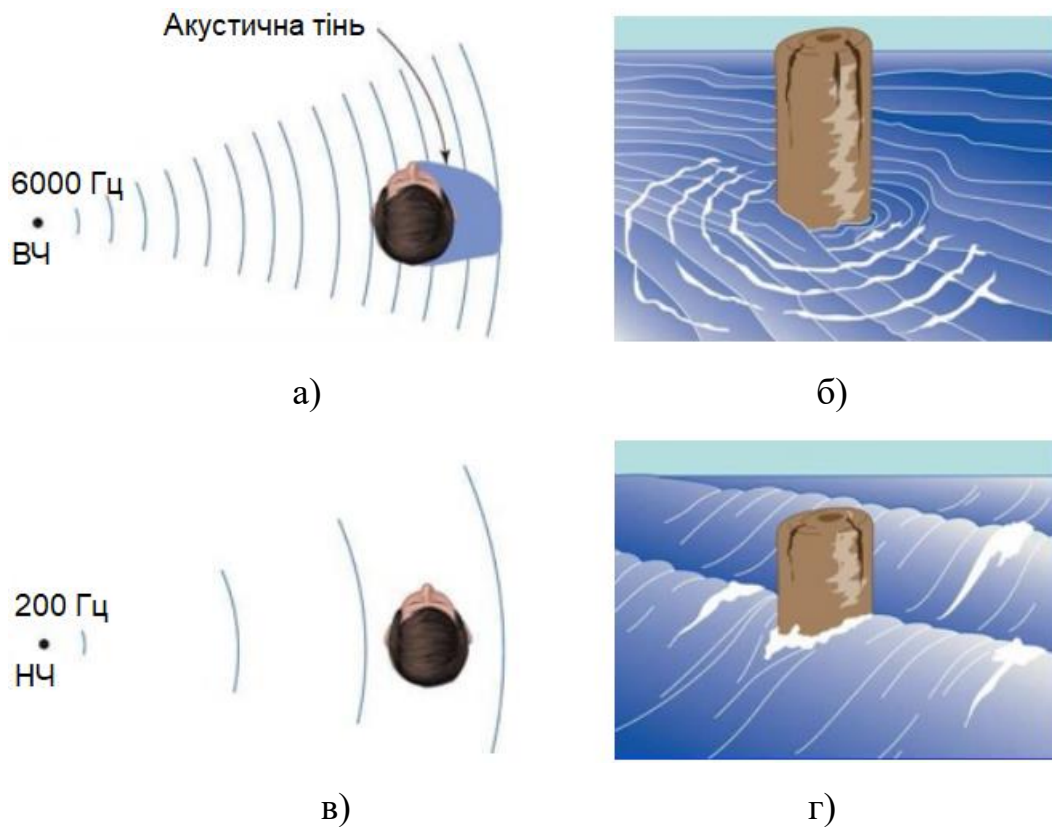


Рисунок 1.3 – Огинання голови на низьких частотах (в) і акустична тінь на високих звукових частотах (а), а також аналогія з хвилями води (б,г)

Ця "акустична" тінь голови зменшує інтенсивність звуку, що надходить у вухо, розташоване далі джерела звуку.

Просторова рознесеність b двох слухових приймачів (вушних раковин), та екрануючий вплив голови і торса за рахунок дифракційних ефектів призводить до значних відмінностей між сигналами, що надходять у праве та ліве вухо, що дозволяє зробити локалізацію звукового джерела у просторі, обумовлену трьома фізичними факторами [5]:

- часовим (Interaural Time Difference – ITD) – що виникає через розбіжність за часом моментів приходу однакових фаз звуку до лівого та правого вуха;

- інтенсивності (Interaural Intensity Difference – IID) – виникає через неоднакову величину інтенсивностей звукової хвилі внаслідок дифракції її навколо голови та утворення "акустичної тіні" з боку, зворотного джерелу звуку, як показано на рис. 1.3, б;

– спектральним – що виникає через різницю в спектральному складі звуків, що сприймаються лівим і правим вухом, внаслідок неоднакового екрануючого впливу голови та вушних раковин на низькочастотні та високочастотні складові складного звуку.

Розглянемо часову різницю – Interaural Time Difference – ITD.

1.2.2 Локалізація по часовій різниці ITD

Різницю часу приходу однакових фаз звуку до вух (ITD) можна легко розрахувати, знаючи різницю ходу звукової хвилі $\Delta l = l_2 - l_1$ до лівого і правого вуха [6]:

$$ITD = \frac{\Delta l}{c}, \quad (1.1)$$

де c – швидкість поширення звукової хвилі.

Сенс величини ITD можна зрозуміти з рис.1.4 [6].

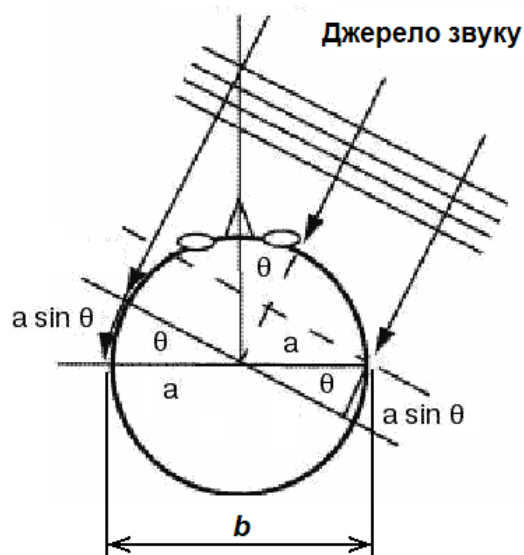


Рисунок 1.4 – Визначення різниці ходу променів до лівого і правого приймачів

Дослідження залежності між напрямом локалізації джерела звуку в горизонтальній площині, що визначається кутом θ і часом затримки ITD , призводять до наступного простого співвідношення [6]:

$$ITD = \frac{a \cdot \sin \theta + a \cdot \sin \theta}{c} = \frac{2a \cdot \sin \theta}{c} = \frac{b \cdot \sin \theta}{c}. \quad (1.2)$$

де θ – азимутальний кут, що відраховується в горизонтальній площині від площини симетрії голови (рис. 1.4);

$a = b/2$ – радіус голови.

Різниця часу приходу однакових фаз звуку до вух $ITD = 0$ с при розташуванні звукового джерела точно посередині і дорівнює b/c для розташування джерела навпроти одного вуха, що становить $\sim 0,7$ мс (середній радіус голови ~ 9 см, найкоротша відстань навколо голови від одного вуха до іншого ~ 26 см).

Відмінності часу приходу звукових хвиль щодо різних кутів розташування джерела для частоти $f = 1500$ Гц показано рис.1.5 [6].

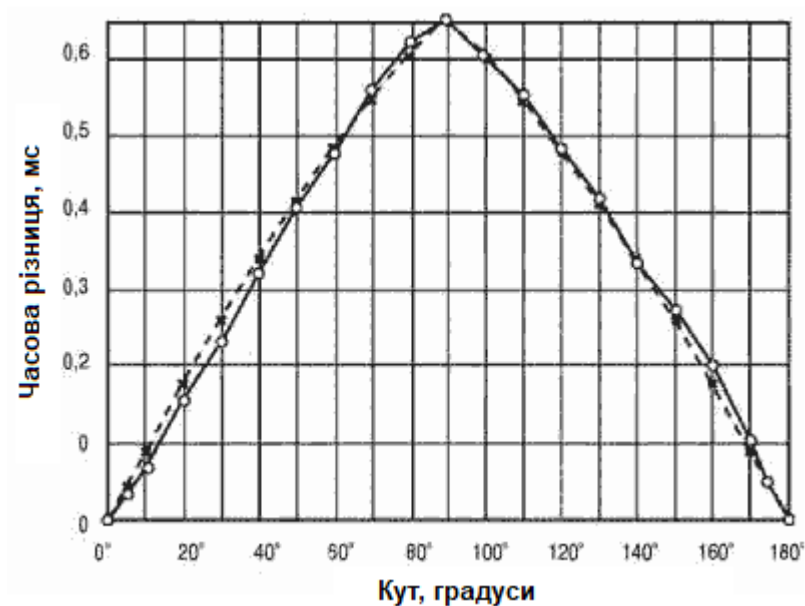


Рисунок 1.5 – Залежність міжвушної часової різниці від кута розташування джерела звуку

Як видно з рис.1.5, при переміщенні джерела звуку навколо голови максимальна різниця у часі виникає при $\theta = 90^\circ$. На низьких частотах ця різниця часу збільшується [7].

Для синусоїдальних коливань при частоті $f=800$ Гц максимальний час запізнення ITD стає рівним половині періоду коливання $T/2$, а при вищих частотах – перевищує половину періоду ($ITD > T/2$). У цьому випадку виникає неясність у фазових співвідношеннях коливань, що діють на праве і ліве вухо: з однаковою основою можна вважати, що одна хвиля відстає по фазі від іншої на час ΔT секунд або випереджає її на цей час. Отже, граничне значення часу запізнення, що правильно сприймається слухом, не повинно перевищувати половини періоду.

Відповідно до цього найбільше значення азимутального кута θ_{\max} , що визначається часовим бінауральним ефектом, з підвищенням частоти зменшується. Це ілюструється даними табл. 1.1, в якій наведено розрахункові значення θ_{\max} , обчислені для різних частот за формулою (1.2) шляхом встановлення $ITD=T/2$ [7].

Таблиця 1.1 – Розрахункові значення θ_{\max} для різних частот

f , Гц	$T/2$, мс	θ_{\max} , град.	f , Гц	$T/2$, мс	θ_{\max} , град.
400	1,250	90	2000	0,250	24
800	0,625	90	2400	0,208	19
1200	0,417	42	3200	0,151	14
1600	0,313	30	4000	0,125	11

Наприклад, при частоті 3200 Гц час запізнення $ITD = T/2$ створює відчуття кутового переміщення лише на 14° . Однак ця обставина не така істотна, тому що в цій області частот при зміні напрямку приходу звукових хвиль вже досить сильно позначається дифракція звуку навколо голови, тобто набуває чинності фактор інтенсивності.

Розглянемо різницю інтенсивностей – Interaural Intensity Difference – IID.

1.2.3 Локалізація по різниці інтенсивностей ІІД

Як видно з рис. 1.2, а, по мірі підвищення частоти за рахунок дифракції утворюється "акустична тінь" і інтенсивність звуків, що досягають протилежного джерела вуха ставати менше. Найбільша різниця рівнів звукових тисків, що діють на ліве та праве вухо, виникає при бічному положенні джерела (90°). Для цього випадку на рис. 1.6 наведено експериментально отриманий графік частотної залежності різниці рівнів звукових тисків ΔN у лівого і правого вуха [8].

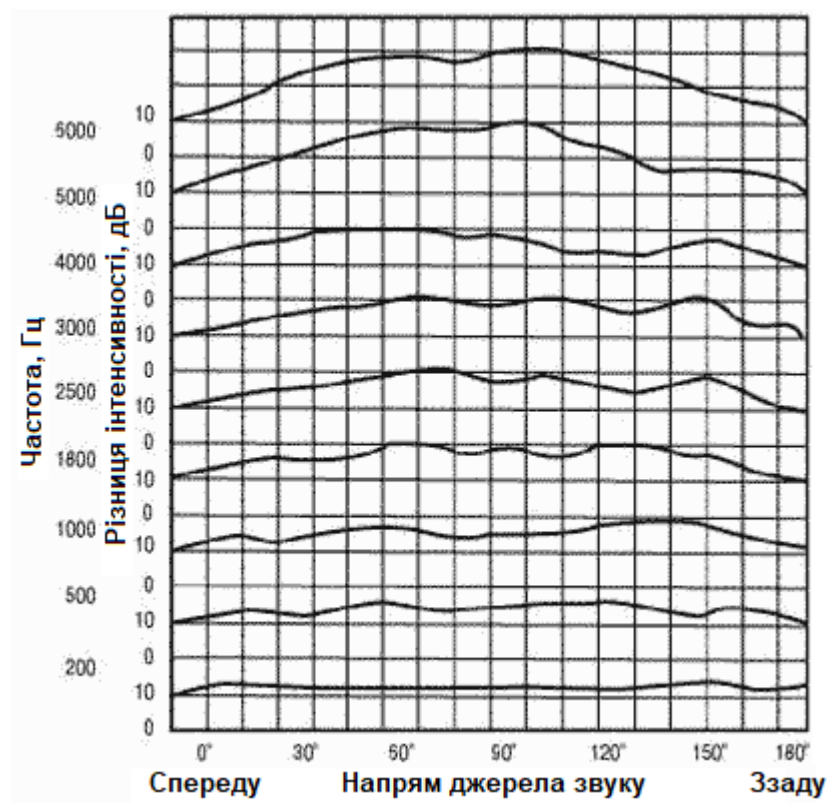


Рисунок 1.6 – Залежність міжвушної різниці інтенсивності від кута розташування джерела звуку і частоти

З графіка видно, що з підвищення частоти ця різниця істотно зростає, досягаючи на 5000 Гц величини ~ 20 дБ [8].

Остання обставина не означає, що при підвищенні частоти звуку загострюється локалізація. Навпаки, чисті тони дуже високих частот (понад 8000 Гц) майже не піддаються локалізації. Так само слабо виражена

здатність людини визначати напрямок на джерело синусоїдальних звуків низької частоти (нижче 300 Гц вона стає значно гіршою, а нижче 150 Гц відсутня взагалі), тому в сучасних системах "домашній театр" розташування низькочастотних блоків (subwoofer) може вибиратися довільно [8].

Дослідження помилок при локалізації положення синусоїдального джерела показали (рис. 1.7), що найбільші помилки людина робить в області частот 2000...4000 Гц, де, схоже, відбувається зміна механізмів локалізації від часового до інтенсивності [8].

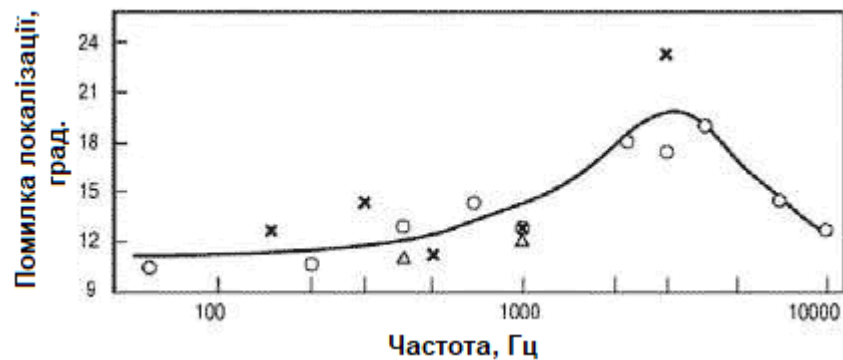


Рисунок 1.7 – Залежність кутової помилки локалізації джерела звуку від його частоти

Аналіз здатності до кутової відмінності двох джерел, що знаходяться у горизонтальній площині, також підтвердив, що у області частот 1500...2000 Гц різко зростає найменша помітна величина кута між джерелами.

Цікаво відзначити, що мінімальна відмінність в азимуті (куті) сприймається, коли джерела перебувають перед слухачем. І тут він досягає 2°. Найбільша відмінність виникає, коли джерела знаходяться праворуч чи ліворуч: виникає так званий "конус невизначеності" з кожної сторони вуха (рис. 1.8), всередині якого зміна положення джерела звуку не викликає відчуття зміни його положення [9].

Це пояснюється тим, що при розташуванні джерела збоку виходить велика різниця і в інтенсивності, і в часі, тому зрушення джерела дають малу відносну зміну загальної різниці. І тому для локалізації дуже важливий рух голови – це змінює положення конуса і зводить нанівець його вплив.

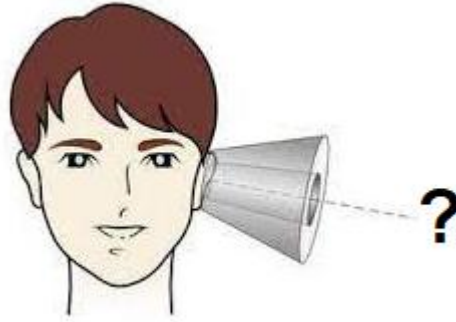


Рисунок 1.8 – Конус невизначеності

Розглянемо локалізацію по спектральним відмінностям – Interaural Spectral Difference – ISD.

1.2.4 Локалізація по спектральним відмінностям ISD

Найбільша гострота локалізації досягається при сприйнятті складних звуків та звукових імпульсів, коли, крім розглянутих раніше причин, дається взнаки ще й спектральний фактор. Наприклад, якщо звук, що приходить під кутом $\theta = 90^\circ$, містить як низькочастотні, так і високочастотні складові, то в спектрі звуку, що діє на дальнє вухо, високочастотних складових буде менше, так як на цих частотах позначиться тіньова дія голови (рис.1.9) [10].

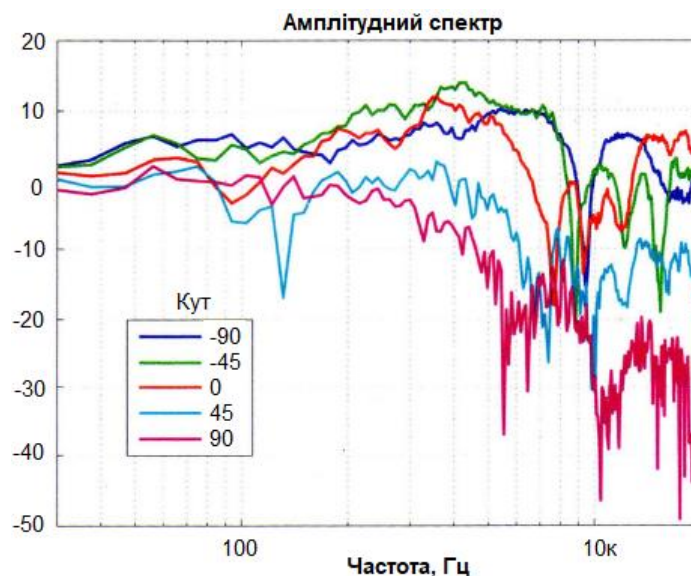


Рисунок 1.9 – Відмінність в амплітудному спектрі для різних кутів розташування звукового джерела

Крім того, самі вушні раковини виробляють складну фільтрацію звуку, яка залежить від його частоти, що буде розглянуто далі. Істотне значення для локалізації має також енергія перехідних процесів, причому найбільше значення має у звуку низькочастотних складових перехідного процесу. Тому при прослуховуванні музичних і мовних сигналів зміна спектрального складу сигналу, отже, та її тембру, залежно з його розташування, допомагає у локалізації.

У цілому нині аналіз здатності до локалізації в горизонтальній площині показав, що найменший відчутний кут відхилення джерела при сприйнятті звукових імпульсів становить близько 3° . Цю величину слід вважати кутовий, або бінауральною роздільною здатністю слуху. Однак слух помічає кутове зміщення на 3° , але при визначенні напрямку робить помилку в середньому на 12° . Тому точність локалізації має величину 12° для джерел, що у передній полуплоскості, а джерел, розташованих позаду слухача, ця точність набагато менше.

1.2.5 Вертикальна (висотна) локалізація

Здатність визначати напрямок приходу звуку у вертикальній площині у людини розвинена значно слабше, ніж у горизонтальній. Вона становить $10...15^\circ$ (у порівнянні з 3° в горизонтальній) [11].

Цю здатність зв'язують зазвичай з орієнтацією і формою вушних раковин: якщо у вушний канал поставити мікрофони і записати звук від джерела, що знаходиться в різних точках медіанної площини (також і в горизонтальній площині), то АЧХ (рис. 1.10) буде різною при надходженні звуку спереду-зверху і ззаду [11].

На АЧХ чітко видно піки за рахунок відбиття від вушної раковини в області $4...8$ кГц, хоча є піки і нижче 2 кГц за рахунок відбиття від грудної клітки та спини слухача.

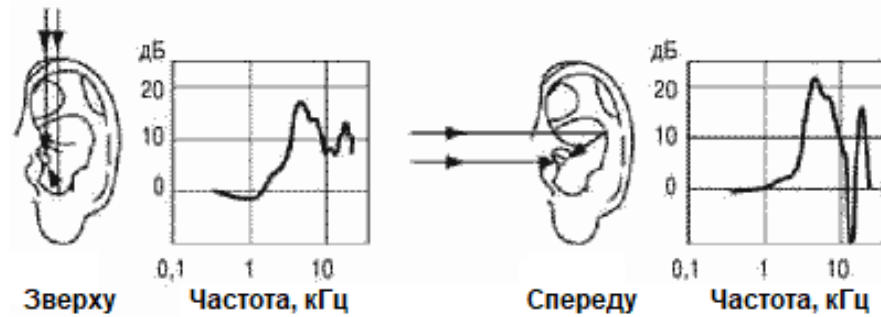


Рисунок 1.10 – Залежність АЧХ слуху від напрямку розташування джерела звуку в вертикальній площині

Вушна раковина має складну геометрію, вона діє як акустична антена:

- на низьких частотах вона посилює загальну енергію сигналу,
- на середніх та високих частотах починають позначатися резонанси її внутрішніх порожнин, посилюючи деякі частоти.

Крім того, відбувається інтерференція прямого звуку зі звуком, відбитим від окремих ділянок вушної раковини, тобто вушна раковина діє як фільтр, вносячи максимальні спотворення в області 6...16 кГц, причому форма цих спотворень залежить від того, спереду або ззаду знаходиться джерело звуку, та під яким кутом підйому він розташований у медіанній площині.

Вид АЧХ сигналу, записаного на мікрофони, що знаходяться у вушних раковинах за різних положень джерела, показаний на рис.1.11. Вони називаються бінауральними передавальними функціями голови – HRTF [11].

Ця залежність АЧХ звукового тиску, що надходить на барабанну перетинку лівого та правого вуха, від положення джерела, використовується для порівняння спектральних компонент сигналу, що приходить спереду і ззаду або зверху, та їх локалізації. Тому широкосмугові сигнали краще локалізуються, ніж вузькосмуговий шум.

Якщо звукові сигнали подавати через навушники, вушні раковини виявляються притиснутими до голови. Оскільки така ситуація для мозкового процесора є неприродною, людина втрачає здатність виробляти локалізацію у просторі, поміщаючи у своїй джерело звуку як усередину голови.

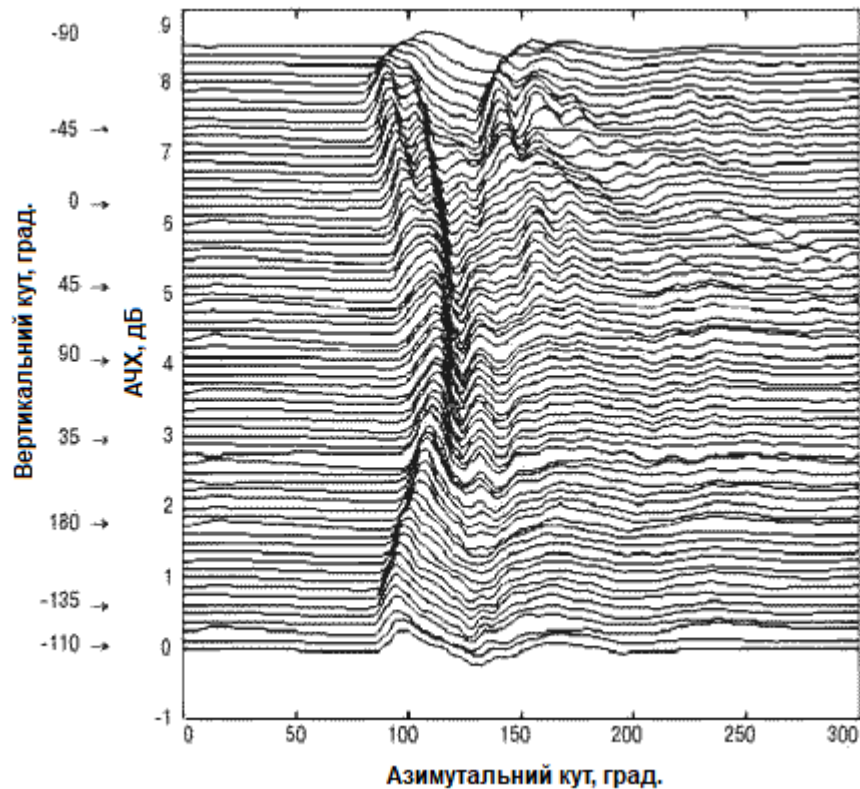


Рисунок 1.11 – АЧХ звукового тиску в залежності від положення джерела по родиз

Ця властивість називається латералізацією і спричиняє значну стомлюваність людей, що тривалий час працюють у навушниках. В даний час створені цифрові процесори, які роблять попередню фільтрацію сигналів у навушниках, аналогічну тому, як це робить вушна раковина. Це дає можливість "виносити" звуковий образ із голови, полегшуючи роботу звукорежисерів, операторів та ін.

1.3 Глибинна локалізація звуку (оцінка відстані до джерела)

Чутливість слуху до відстані до джерела має життєво важливе значення – гудок автомобіля, що ззаду близько чи далеко, повинен викликати різну реакцію. Однак саме ця властивість слухової системи вивчена недостатньо. Серед основних факторів, що визначають оцінку глибини, можна виділити наступні.

Зменшення рівня звукового тиску з відстанню – на низьких частотах, де довжина хвилі велика ($\lambda = 5 \dots 15$ м), будь-яке джерело можна вважати точковим, і звукові хвилі навколо нього – сферичними. У сферичній хвилі площа поверхні збільшується пропорційно квадрату відстані ($S = 4\pi r^2$), і відповідно тиск падає обернено пропорційно відстані r [12],

$$I = \frac{I_0}{r^2}, \quad (1.3)$$

тобто на 6 дБ при кожному подвоєнні відстані.

Численні експерименти зі зміщення джерела та оцінки віддаленої відстані до слухового образу (виконані в заглушеній камері та на відкритому просторі, рис.1.12 [12]) показали, що, при видаленні джерела-гучномовця на відстань r від 1 до 10 м, слуховий образ у експертів (в заглушеній камері за відсутності візуального контролю) також зміщувався у цьому напрямі, але мало місце відставання слухового образу від реального джерела – що далі, то більше.

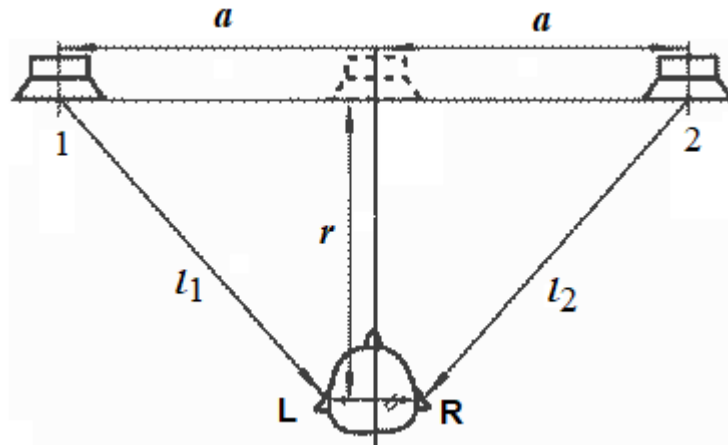


Рисунок 1.12 – Схема експерименту з визначення сприйняття глибини джерела звуку

Відчуття подвоєння відстані до звукового об'єкта виникало лише за зменшення рівня звукового тиску ΔN на 20 дБ (але не на 6 дБ, як при об'єктивному вимірюванні). При цьому точність локалізації була не дуже

велика: помилка для широкосмугового сигналу (кляцання, годинник тощо) становила від 3,5 до 30 см при зміні відстані від 1 до 8 м [12].

Якщо при збільшенні відстані підвищувати напругу на гучномовці так, щоб рівень звукового тиску у слухового каналу експерта не змінювався, здатність визначати відстань до джерела (глибинна локалізація) зникає.

Таким чином, за відсутності візуального контролю в умовах вільного поля, коли відбиті сигнали поглинаються (наприклад, у заглушеній камері або у вільному просторі), рівень звукового тиску в місці розташування експерта є вирішальною ознакою, за якою оцінюється відстань до джерела.

При великих відстанях ($r > 15$ м) починає позначатися згасання, що залежить від відстані, що проходить звуковою хвилею. При цьому високочастотні складові загасають швидше, і спектральний склад сигналу при видаленні джерела змінюється (тембр стає "темніше"). Крім того, на поширення звуку впливає вологість повітря та напрям вітру на відкритому просторі.

Слід зазначити, що можливості слуху з визначення глибини розташування джерела обмежені, є "акустичний горизонт".

На близькій відстані ($r < 3$ м), на глибинну локалізацію починає впливати також дифракція на вушній раковині та голові, тобто позначаються різниці рівнів інтенсивностей ($f > 1500$ Гц) та часові затримки ($f < 1500$ Гц), як і в попередніх випадках.

Приблизно локалізацію по глибині на відстані менше 3 м можна оцінити за формулою [12]:

$$L = 2c\Delta T \frac{I}{\Delta I}, \quad (1.4)$$

де ΔT – часова різниця сигналів,

I – середня інтенсивність,

ΔI – різниця інтенсивностей.

При цьому на близьких відстанях змінюється спектральний склад при зміщенні звукового джерела за рахунок дифракційних ефектів, тобто змінюється тембр ("тьмяніє" при наближенні до джерела).

Таким чином, при зміні відстані до джерела змінюється одночасно гучність і тембр, що служить різними ознаками.

Загальна точність глибинної локалізації дуже велика, при зміщенні широкосмугового звукового джерела від 50 см до 150 см помилки становлять 15...30%.

Істотну роль для глибинної локалізації грає особистий досвід, якщо слухачеві знайомий сигнал, і якщо він може зробити візуальну оцінку, то точність глибинної локалізації багаторазово збільшується.

Точність глибинної локалізації звукового джерела значно підвищується в закритому приміщенні, що реверберує. Роль реверберації щодо оцінки віддаленості джерела, наприклад, розподілу музикантів за глибиною оркестру, винятково велика. При переміщенні звукового джерела по глибині змінюється відношення енергії прямого звуку до відбитого (ревербераційного) звуку, що допомагає точніше визначити відстань до джерела. Найважливіше значення має також різницю в часі між прямим звуком і приходом перших відбитків та співвідношення їх за рівнями.

Приблизно, глибинну локалізацію у приміщенні можна оцінити так [12]:

$$L = \frac{\alpha S}{50(1 - \alpha)} \sqrt{\frac{E_{rev}}{E_{пр}}}, \quad (1.5)$$

де α – коефіцієнт поглинання,

S – площа поверхонь приміщення,

$E_{rev} / E_{пр}$ – відношення щільностей відбитої та прямої енергії звуку.

Суб'єктивне відчуття "акустики залу" визначається цілим рядом параметрів, деякі з них прямо пов'язані з просторовою локалізацією.

1.4 Загальне просторове враження

Просторове враження (камерність, інтимність, близькість) – визначає для слухача розмір простору, що здається. Різні стилі музики потребують різних його значень. Композитор (звукорежисер, виконавець та ін.) повинен мати на увазі цей параметр, інакше буде невідповідність стилю музики розміру приміщення (наприклад, звучання органу в маленькій кімнаті), що чітко відчувається слухачами.

Просторове враження визначається різницею у часі між прямим звуком та першими відбиттями (рис.1.13) [13].

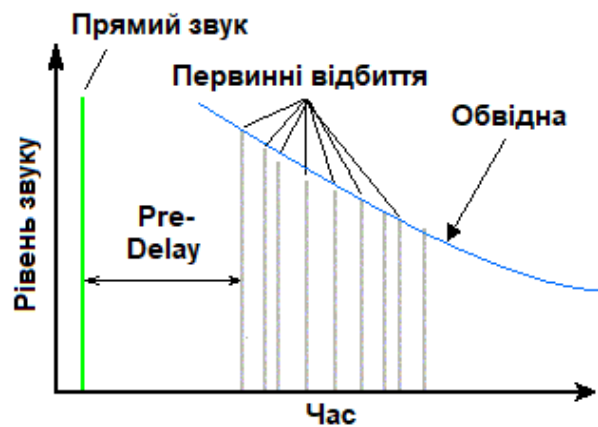


Рисунок 1.13 – Часова структура процесу реверберації та визначення часу приходу ранніх відбиттів

У залах із "інтимною" акустикою ця різниця становить для слухачів у центрі зали 15...30 мс. Якщо ці відбиття мають схожі спектр і обвідну, та їх гучність не вище прямого звуку, то в межах цього часу вони не сприймаються як окремі відображення, а допомагають у покращенні локалізації прямого звуку, у тому числі глибинної. Мала різниця у часі приходу перших відбитків й у музичних кімнат ХХVIII століття, середня – для концертних залів 19 століття, велика – для соборів [13].

Амбієнтність – відчуття слухача, що музика від джерела (наприклад, оркестру) йде від усього фронту сцени, і звук оточує його з усіх боків.

Тренований слухач розрізняє дві складові у сприйнятті амбієнтності: розширення площі джерела звуку, що здається, і оточення (обволікання), коли слухач відчувається зануреним у звук, оточеним ним з усіх боків.

На думку багатьох експертів, розширення площі джерела, що здається, є одним з головних індикаторів акустичної якості концертних залів і приміщень прослуховування. Воно пов'язане з рівнем бічних відбитків - чим вище цей рівень, тим більше розширення джерела, що здається.

Крім того, високий зв'язок з цим параметром показали результати вимірювання на штучній голові коефіцієнта внутрішньослухової крос-кореляції сигналу, усередненого в інтервалі 0...80 мс і вимірюного в третьоктавних смугах з центральними частотами 500, 1000, 2000 Гц. Значення цього коефіцієнта (відповідно до вимірювань Беранека) для дев'ятнадцяти кращих залів світу становлять від 0,35 до 0,6. Ширина звукового джерела, що здається, пов'язана також з рівнем звукового тиску на низьких частотах, в основному в області частот 125 і 200 Гц [13].

Обволікання (оточення) – пов'язане з відчуттям пізнього реверберуючого звуку, що надходить з усіх боків (після 80 мс). Воно визначається конструкцією залу: наявністю нерегулярностей стін, балконів та ін., тобто всіма конструктивними елементами, які забезпечують прихід звуку з різних боків. Відчуття від звучання музики у слухача, до якого відбиті звуки приходять з усіх боків: від стелі, стін, підлоги тощо будуть істотно відрізнятися від відчуттів слухача, що сидить під балконом, до якого звук приходиться тільки з фронту. Воно пов'язане з коефіцієнтом внутрішньослухової крос-кореляції, усередненого за період від 80 мс до 1 с [13].

Таким чином, наш слуховий апарат, використовуючи різні механізми обробки звукових сигналів, дозволяє визначити та локалізувати положення звукового джерела у тривимірному просторі. Саме ця здатність використовується під час створення сучасних систем комп'ютерного моделювання тривимірних звукових просторів (системи ауралізації).

Ця ж властивість слуху використовується і в сучасних системах просторового звуковідтворення. Створюючи штучні умови, до яких наша слухова система не була пристосована в процесі природної еволюції, наприклад, поміщаючи два однакові гучномовці на однаковій відстані від лівого та правого вух, подаючи на них однакові сигнали (Мал. 9), ми змушуємо наш слуховий апарат поміщати чутне (уявне) джерело звуку посередині між реальними звуковими джерелами. Простір таких уявних джерел, створюваних різними просторовими системами відтворення (стереофонічними, Surround та ін), і створює стереоефект – по суті, це "великий обман" нашого слухового апарату. Питання, як формується і як управляється цей просторовий образ уявних (віртуальних) джерел, може бути предметом розгляду окремої роботи.

1.5 Висновки по розділу 1

1. В першому розділі визначені явища, що беруть участь в формуванні просторового сприйняття звуку людиною. При визначенні азимутального напрямку на джерело має значення ефект різниці часу приходу. Він грає роль на частотах приблизно від 300 Гц до 4 кГц. Далі ефект різниці часу приходу зменшується, тому що часовий зсув значно перевищує період колювання.

2. На перехідному етапі біля 4 кГц все більший вклад у просторове сприйняття починає мати різниця інтенсивностей звуку за рахунок ефекту екранування головою. Максимальний ефект від інтенсивності триває до частот 6...6,5 кГц, після 8 кГц даний ефект майже не впливає на просторове сприйняття, тому що на перший план виходить різниця в спектральному складі звуку зліва і справа.

3. Найбільша гострота локалізації досягається при сприйнятті складних звуків та звукових імпульсів, коли дається взнаки ще й спектральний фактор. Наприклад, якщо звук, що приходить під кутом 90° , містить як НЧ, так і ВЧ

складові, то в спектрі звуку, що діє на дальнє вухо, ВЧ складових буде менше, так як на цих частотах позначиться тіньова дія голови.

Істотне значення для локалізації має також енергія перехідних процесів. Тому при прослуховуванні музичних і мовних сигналів зміна спектрального складу сигналу, отже, та її тембру, залежно з його розташування, допомагає у локалізації.

4. Здатність визначати напрямок приходу звуку у вертикальній площині у людини розвинена значно слабше, ніж у горизонтальній: $10...15^\circ$ у порівнянні з 3° в горизонтальній. Цю здатність зв'язують з орієнтацією і формою вушних раковин: АЧХ буде різною при надходженні звуку спереду-зверху і ззаду. Отже динамічна зміна тембра доріжки може викликати відчуття переміщення джерела по вертикалі. Такі приклади є в сучасній музиці.

5. На відчуття глибини і загальне просторове відчуття крім гучності впливає час приходу ранніх відбиттів і загальна структура ревербераційного хвоста. Різні стилі музики потребують різних його значень. Звукорежисер, повинен мати на увазі цей параметр, інакше буде невідповідність стилю музики розміру приміщення (наприклад, звучання органу в маленькій кімнаті), що чітко відчувається слухачами.

6. Отже просторове відчуття відіграє суттєву роль в сприйнятті звукового контенту слухачем. Звукорежисер при зведенні і майстерингу звуку має враховувати всі розглянуті ефекти.

Метою кваліфікаційної роботи є аналіз методів і прийомів просторової обробки звукових треків при зведенні і майстерингу звуку і формулювання рекомендацій з просторової обробки для робітників звукової індустрії, студентів та випускників відповідних навчальних закладів.

7. Кваліфікаційна робота виконується на кафедрі МІРЕС ХНУРЕ. На кафедрі проводяться дослідження в таких наукових областях, як виявлення та розпізнавання БПЛА за результатами акустичного спостереження [14-17], створення систем зондування атмосфери за допомогою акустичних хвиль

[18-21]. Цілий ряд студентських доповідей [22-25] і атестаційних робіт магістрів минулих років [26-28] присвячені дослідженню систем звукозапису. Отже, дослідження в даній роботі пов'язані і ґрунтуються на традиційному напрямку робіт колективу і студентів кафедри МІРЕС.

2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ В ЗВЕДЕННІ І МАЙСТЕРИНГУ ЗВУКУ

Просторова обробка є невід'ємною частиною створення грамотного гармонійного міксу. Часто під поняттям просторової обробки мається на увазі обробка сигналу ревербераторами, але це лише частина ширшого поняття.

Насправді просторова обробка покликана вирішувати завдання розміщення інструментів у просторі. Цей вид обробки звуку дає можливість слухачеві зрозуміти, де знаходиться інструмент у просторі.

Можна виділити три площини позиціонування звуку:

- ширина (ліворуч, праворуч, по центру);
- висота (вище, нижче);
- глибина (ближче, далі).

2.1 Позиціонування по ширині

Основним інструментом звукорежисера для розміщення інструменту за шириною є панорамування (рис.2.1).



Рисунок 2.1 – Види обробки для регулювання ширини

Часто використовуючи просте панорамування можна досягти дуже хорошого результату без застосування додаткових ефектів. Насамперед це стосується ударних інструментів та сольних партій.

Розглянемо амплітудне панорамування у двоканальній системі.

Амплітудне панорамування – основний метод створення віртуального джерела звуку в довільній точці між парою гучномовців, що знаходяться під кутом $\varphi_0=30^\circ$ (рис.2.2) [9].

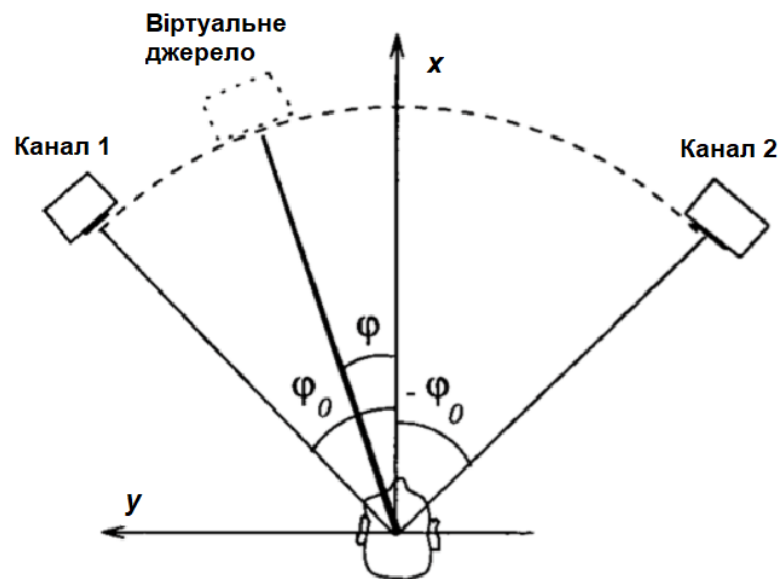


Рисунок 2.2 – Геометрія розташування джерел звуку при амплітудному панорамуванні

При зменшенні гучності одного з гучномовців (у стереосистемі), віртуальне джерело зміщується у бік другого гучномовця. При переміщенні віртуального джерела по кривій між гучномовцями, необхідно враховувати, щоб звукова енергія, що випромінюється цим джерелом, була однаковою в будь-якій точці між гучномовцями. Розглянемо закони панорамування.

Найпоширеніший закон, що застосовується в мікшерних консолях – синусоїдально-косинусоїдальний. Регулятор панорамування змінює рівень сигналу у лівому g_L та правому g_R каналах таким чином, що у лівому каналі рівень сигналу змінюється пропорційно значенню синуса кута повороту регулятора, а правому пропорційно значенню косинуса.

Синусоїдально-косинусоїдальний закон [30]:

$$g_L = \cos \varphi; \quad g_R = \sin \varphi. \quad (2.1)$$

де φ – кут між віртуальним джерелом та віссю, $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$;

g_L, g_R – рівні гучності гучномовців.

При цьому інтенсивність сигналу має бути постійною:

$$g_L^2 + g_R^2 = g_{\text{вх}}^2. \quad (2.2)$$

Існують ще два тригонометричні закони: синусоїдальний та тангенціальний.

Згідно з синусоїдальним законом, спочатку запропонованим Аланом Блюмлейном і переформульованого згідно з теорією фазорів Бенджаміна Бауера [31–33], положення віртуального джерела визначається так:

$$\sin \varphi = \sin \varphi_0 \frac{g_R - g_L}{g_R + g_L}. \quad (2.3)$$

Закон синусів застосовується тоді, коли голова слухача перебуває в одному положенні і не рухається. У випадку, коли слухач стежить за джерелом звуку, крутить голову, коректний буде тангенціальний закон [29–31]:

$$\tan \varphi = \tan \varphi_0 \frac{g_R - g_L}{g_R + g_L}. \quad (2.4)$$

Результати показали, що вищеописані способи не відрізняються високою точністю (відповідністю розташування віртуального джерела потрібної точки). Наприклад, у разі тангенціального закону некоректно локалізуються сигнали в діапазоні від 1 кГц до 2 кГц [30]. А для

синусоїдально-косинусоїдального закону показано, що широкосмугові сигнали локалізуються ширше за потрібне положення [31]. Саме тому зараз використовуються інші, більш точні методи, доповнені зміною фази і розстройкою висоти тону (рис.2.3).

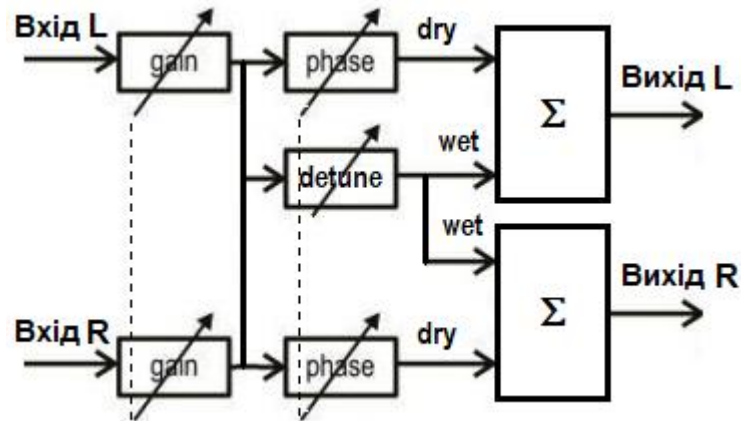


Рисунок 2.3 – Послідовність операцій просторової обробки

Важливим інструментом створення широкого міксу є затримка каналів один відносно одного. Наприклад, правий канал відстає від лівого на кілька мілісекунд. Така затримка робить звук дуже широким. Цей прийом часто використовується для синтезу. Також така затримка використовується у методиці створення широкого звучання на основі дабл-треку.

Схожого ефекту можна досягти, використовуючи зміщення фази сигналу. Однак у цьому випадку слід стежити за фазовими спотвореннями, які мають місце, особливо на низьких частотах.

Для створення широкого звуку при синтезі, крім затримки, часто використовується розлад (detune) голосів. Цей параметр є у більшості синтезаторів.

Для того щоб створити широкий звук необхідно вибрати більше одного голосу і трохи зсунути їх один щодо одного. Чим більше голосів і рівень розладу тим більш розмитий і спотворений звук.

У DAW (цифрових звукових робочих станціях) для якісного панорамування існують Ambisonic-плагіни (програми, що розширюють

можливості) кодування-декодування, які є або безкоштовними, або входять до складу DAW.

На рис.2.4 показані приклади Ambisonic-плагінів в DAW-програмі Ableton Live.

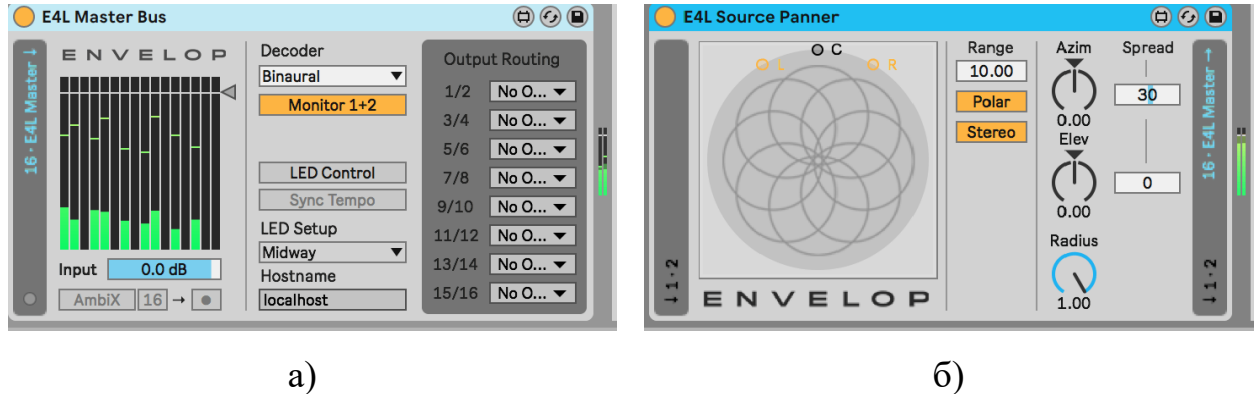


Рисунок 2.4 – Плагін Master Bus Envelop, декодуючий звук у форматі Ambisonics (а), плагін Source Panner Envelop, що кодує одно-або двоканальний звуковий сигнал у формат Ambisonics (б)

Для цифрової звукової станції Ableton Live існує набір плагінів (розроблений у системі Max for Live) під назвою Envelop (<http://www.envelop.us/software/>). Так як сама програма Ableton не підтримує багатоканальні wav-файли, то дані плагіни можуть лише кодувати до 16 окремих аудіоканалів у формат Ambisonics з подальшим декодуванням у вибрану систему гучномовців або в бінауральний сигнал [5] і кодувати монофонічний або стереофонічний звукове джерело у формат Ambisonics.

2.2 Регулювання висоти

Основним інструментом, що дозволяє визначити розташування інструмента по висоті, є синтез. В першу чергу синтез, а не еквайзер, визначає висотне положення. Саме на етапі синтезу формуються тембральні характеристики звуку та його висотність. А за допомогою еквайзера можна змінити частотні характеристики та трохи скоригувати висотне розташування інструмента або іншого джерела звуку.

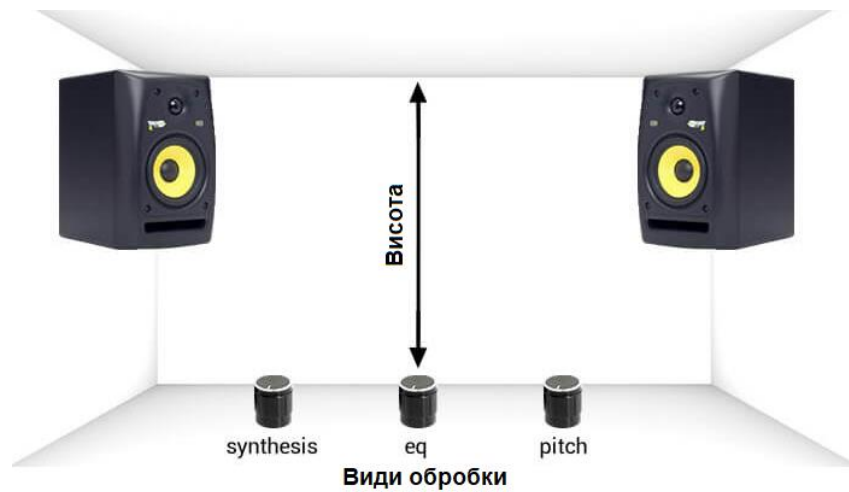


Рисунок 2.5 – Види обробки для регулювання висоти

Параметричний еквайзер дозволяє регулювати декілька окремих смуг частот. Існують різні типи параметричних еквайзерів трисмугові (високі, середні та низькі частоти) та чотирисмугові (високі, верхні середні, нижні середні та низькі частоти) або восьмисмугові. У деяких мікшерах параметричні еквайзери дозволяють регулювати ширину кожної смуги частот.

На рис.2.6 показаний трисмуговий еквайзер, що розділяє частотний діапазон на смугу LOW (низькі частоти), смугу MID (середні частоти) та смугу HIGH (високі частоти).

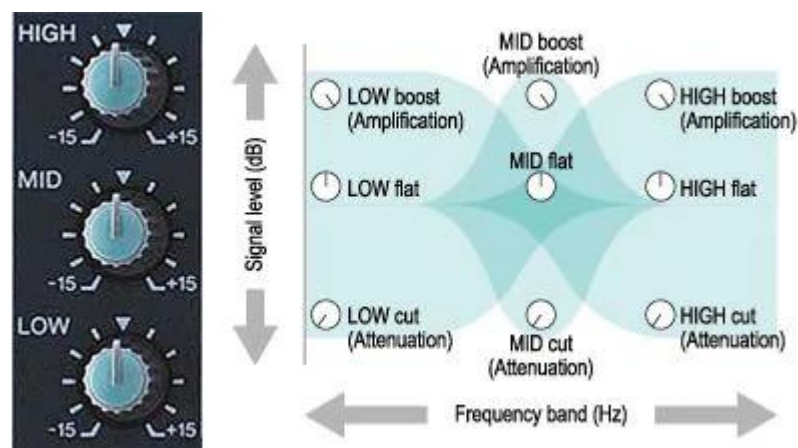


Рисунок 2.6 – Трисмуговий параметричний еквайзер та його налаштування

Ефект Pitch – це зміна висоти звучання без зміни тривалості.

Коефіцієнт масштабування визначається як коефіцієнт, який використовується для розтягування або стиснення спектру з метою регулювання частот таким чином, щоб змістити висоту тону (рис.2.7).

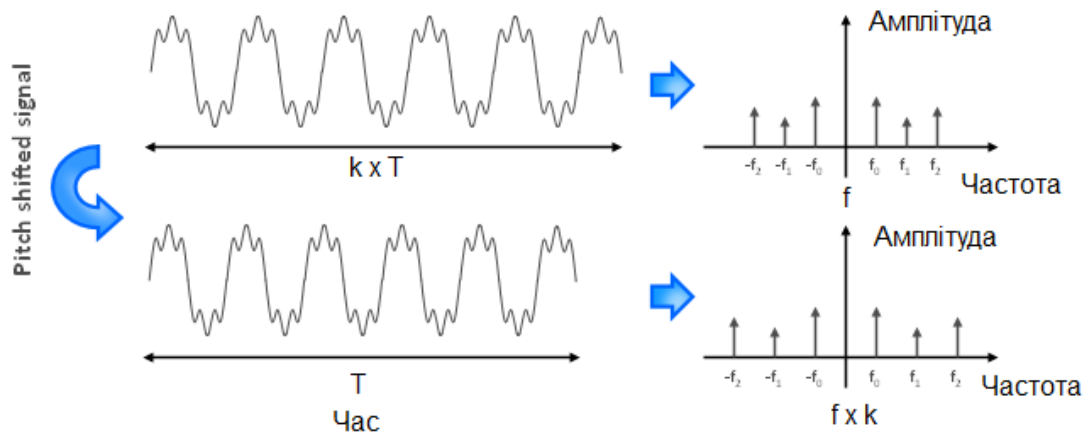


Рисунок 2.7 – Спектральні перетворення при зміні висоти тону

Коли це буде зроблено, виконується ресемплінг, щоб повернутися до початкової тривалості зі зміною висоти тону (рис.2.8).

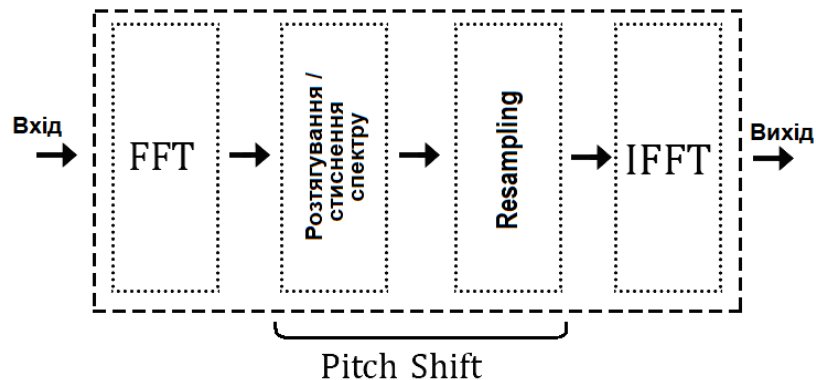


Рисунок 2.8 – Схема алгоритму ефекту Pitch

Якщо немає необхідності зміни висоти тону в режимі реального часу, можна використовувати процедуру швидкого перетворення Фур'є (FFT) для всієї оброблюваної доріжки.

Плагін Frequency Shifter (рис.2.9) має кілька інструментів для зміни висоти треку. У центрі плагіна є два регулятори частоти: один для грубого налаштування, інший для точного налаштування. Якщо регулятор Dry/Wet встановлено на 100%, зсув висоти буде застосовано до всього сигналу.

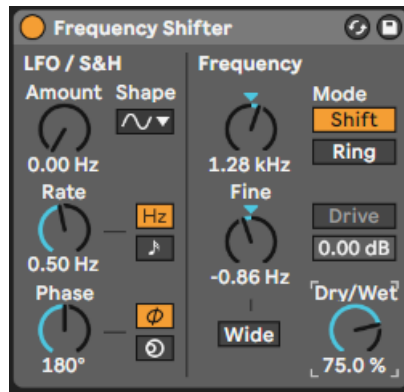


Рисунок 2.9 – Пагін Frequency Shifter

Однак, коли зменшите значення, можна отримати інший баланс між сухим сигналом і нещодавно доданим зсувом.

2.3 Регулювання глибини

Відчуття глибини робить звучання природним, приємним і просторовим. Глибина створюється рахунок рівня сигналу (гучності). Інструменти, які мають більш високий рівень, виходять на передній план і є основними (рис.2.10).



Рисунок 2.10 – Види обробки для регулювання глибини

Однак крім гучності на глибину впливає реверберація та затримка. Це два основні інструменти, які використовуються для створення глибокої просторової картини треку.

На рис.2.11, а показано спрощену модель, де враховуються первинні та вторинні відбиття тільки від двох стін. На рис.2.11, б наведено алгоритм створення ранньої реверберації, що відповідає зазначеним умовам.

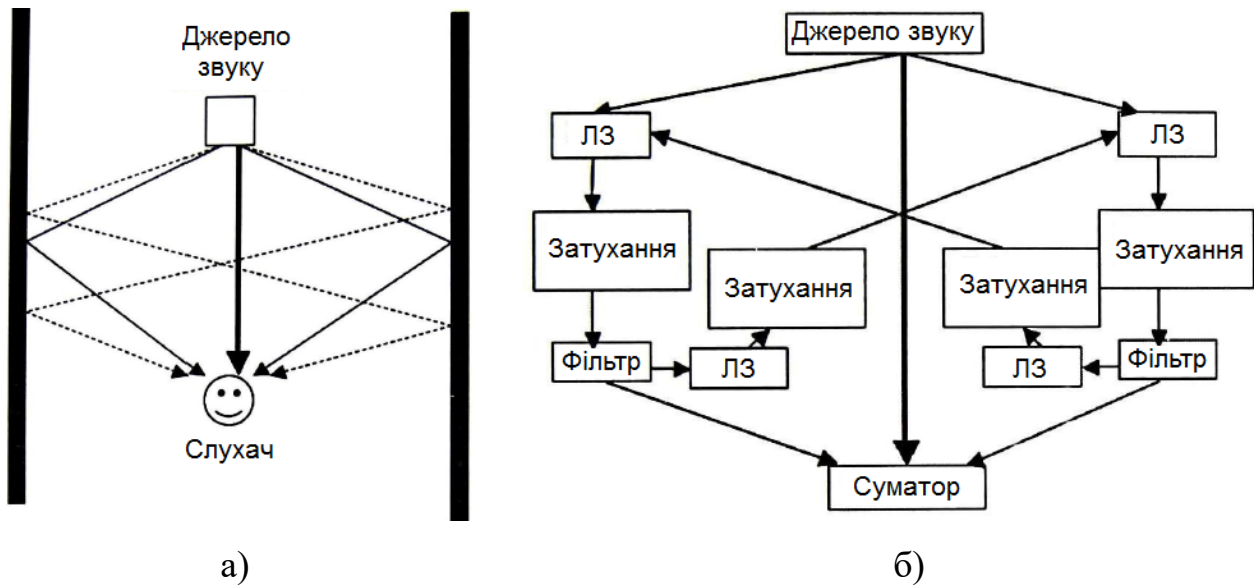


Рисунок 2.11 – Алгоритм ранньої реверберації для моделі із двох перешкод

В даному алгоритмі поширення хвиль моделюється лініями затримки (ЛЗ), величина затримки залежить від розмірів приміщення. Фільтр враховує частотну залежність коефіцієнта звукопоглинання перешкод. Вторинні відбиття враховуються шляхом застосування перехресних ліній зворотного зв'язку.

Для імітації пізніх відбиттів у програмних ревербераторах застосовують гребінчастий і всепропускний фільтри. У гребінчастому використовується тільки зворотний зв'язок (рис.2.12, а), а у всепропускному – прямий і зворотний зв'язок (рис.2.12, б).

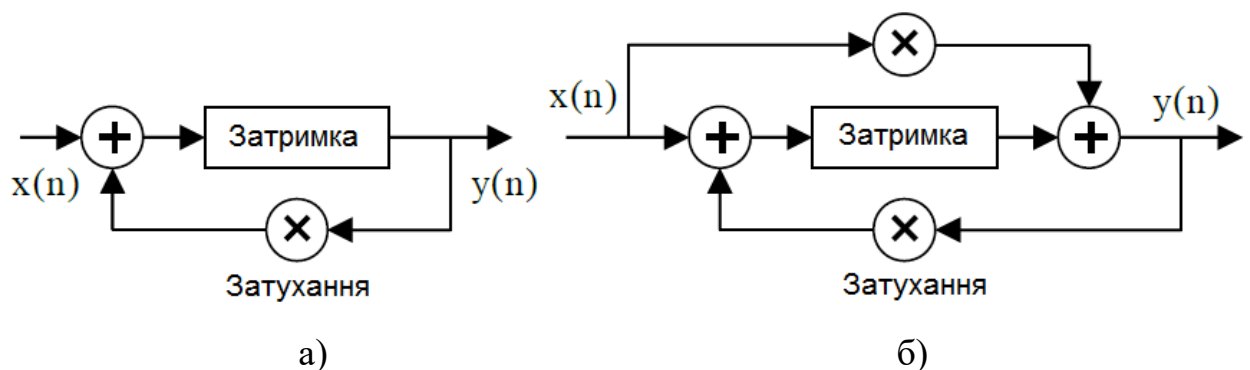


Рисунок 2.12 – Гребінчастий (а) і всепропускний (б) фільтри у ревербераторі

Крім алгоритмічної реверберації існує інший тип – конволюційна реверберація. В математичному виразі конволюційна обробка виконує згортку звукового сигналу $x(t)$ імпульсним відгуком приміщення $h(t)$:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N+M-2} x(n-k)h(n), \quad (2.5)$$

де M і N – кількість відліків сигналу і імпульсного відгуку, які перемножуються.

Тобто, маючи ревербераційний відгук будь-якого приміщення на одиничний імпульс, можна розрахувати реверберацію будь-якого звукового сигналу.

Hybrid Reverb – це новий ревербератор від Ableton, який дозволяє змішувати конволюційну та алгоритмічну реверберацію (рис.2.13).

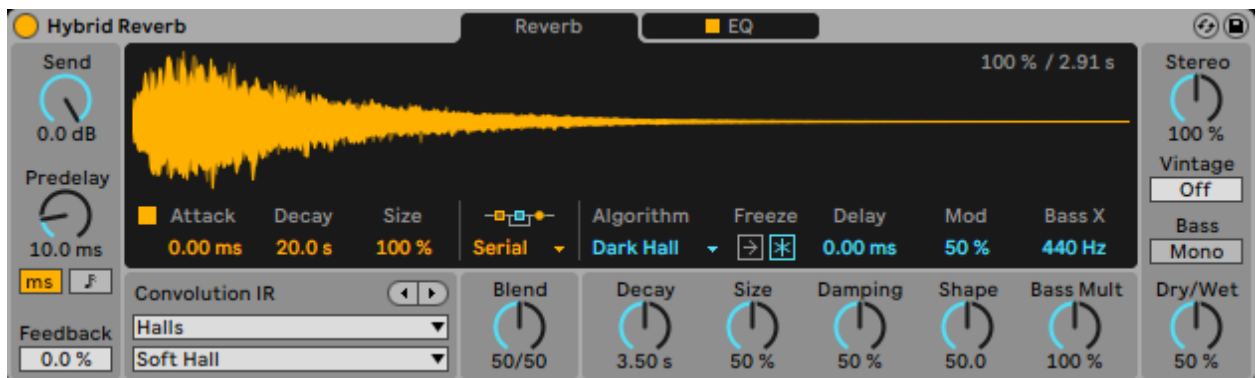


Рисунок 2.13 – Ревербератор Hybrid Reverb від Ableton

Ефект має в запасі велику колекцію конволюційних імпульсів (Impulse Response – IR). Також можна використовувати як імпульс будь-який звук з власної колекції, для цього треба перетягнути семпл у вікно ревербератора. Використовуючи семпл, Hybrid Reverb побудує простір, а також сформує обвідні за допомогою спеціальних елементів керування.

Блок конволюційного ревербератора містить такі настройки:

– Attack – регулює час атаки амплітудної обвідної;

- Decay – регулює час спаду амплітудної обвідної від максимального рівня до рівня затримки (Sustain);
- Size – регулює відносну величину реверберації.

На рис.2.14 показано меню, що дозволяє вибрати тип ревербераційного імпульсу.

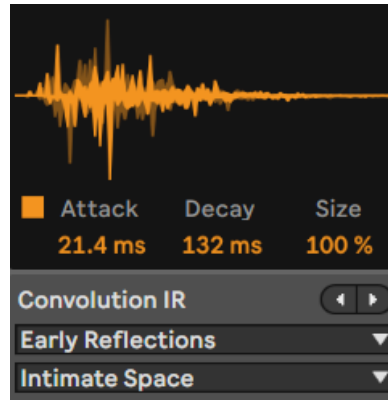


Рисунок 2.14 – Меню вибору типу ревербераційного імпульсу

В Інтернеті розміщено велику кількість імпульсів реальних просторів. Наведемо декілька сайтів, де можна їх скачати: [34–36].

Блок алгоритмічного ревербератора побудований виключно на математичній моделі, він не використовує семплів і містить 5 типів реверберації:

- Dark Hall (Темна зала);
- Quartz (Кварц);
- Shimmer (Світло, що мерехтить);
- Tides (Припливи);
- Prism (Призма).

Для кожного з алгоритмічних ревербераторів можна змінювати такі налаштування:

- Decay – час спаду до -60dB;
- Size – розмір віртуальної кімнати;
- Delay – затримка ранніх відбиттів (працює так само, як і Predelay);

– Freeze – опція відключає вхід ревербератора і "заморожує" параметр загасання (Sustain);

– Freeze In – опція “заморожує” параметр згасання без вимкнення входу реверсу; таким чином відбувається накопичення обробленого сигналу.

Загальні параметри ревербератора:

– Send – регулює коефіцієнт посилення (Gain) сигналу, що відправляється на ревербератор;

– Predelay – регулює попередню затримку сигналу перед його відправкою на ревербератор. Щоби досягти природного звучання, значення параметра Predelay зазвичай зберігають в інтервалі від 1 мс до 25 мс. Трохи нижче за ручку Predelay знаходиться опція синхронізації з хостом, якої немає в стандартному ревербераторі. Тут можна встановити параметр Predelay у мс, або в тактах;

– Feedback – регулює коефіцієнт зворотного зв'язку (повертає аудіо сигнал назад на вхід ревербератора);

– Stereo – регулює параметр стереорозширення. За значення 0 реверб стає монофонічним;

– Vintage – приймає значення: Off, Subtle, Old, Older, Extreme. Регулює зменшення частоти дискретизації. Таким чином емулює характер звучання старих цифрових ревербераторів;

– Bass – при активації налаштування частоти нижче 180 Гц стають монофонічними.

Маршрутизація. Налаштування змішування конволюційного та алгоритмічного ревербераторів знаходяться у блоці Routing та Blend (рис.2.15).

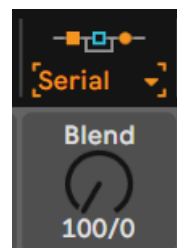


Рисунок 2.15 – Маршрутизація конволюційного та алгоритмічного ревербераторів

У послідовному режимі (Serial) вхідний сигнал відправляється спочатку в конволюційний ревербератор, а потім в один із 5 алгоритмічних ревербераторів.

У паралельному режимі (Parallel) сигнал одночасно вирушає у конволюційний та алгоритмічний ревербератори. Співвідношення ревербераторів регулюється ручкою Blend. Ця настройка буде активна тільки в послідовному або паралельному режимі.

Додатково можна використовувати тільки один з типів ревербераторів, для цього треба вибрати режим Algorithm або Convolution.

2.4 Висновки по розділу 2

Просторова обробка є невід'ємною частиною створення грамотного гармонійного міксу. покликана вирішувати завдання розміщення інструментів у просторі. Цей вид обробки звуку дає можливість слухачеві зрозуміти, де знаходиться інструмент у просторі.

Можна виділити три площини позиціонування звуку: ширина (ліворуч, праворуч, по центру); висота (вище, нижче); глибина (ближче, далі).

В другому розділі проведено теоретичний аналіз методів обробки для позиціонування окремих треків композиції в просторі.

Для позиціонування джерела по ширині в простішому випадку використовують амплітудне панорамування. Розглянуті синусно-косинусний, синусний та тангенціальний закони амплітудного панорамування. Результати показали, що вищеописані способи не відрізняються високою точністю. Наприклад, у разі тангенціального закону некоректно локалізуються сигнали в діапазоні від 1 кГц до 2 кГц. А для синусно-косинусного закону широкосмугові сигнали локалізуються ширше за потрібне положення.

Саме тому зараз доцільно використовувати більш точні методи, доповнені зміною фази і розстройкою висоти тону. Важливим інструментом

створення широкого міксу є фазове панорамування. Цей прийом часто використовується для синтезу. Фазова затримка використовується у методиці створення широкого звучання на основі дабл-треку. Однак у цьому випадку слід стежити за фазовими спотвореннями, які мають місце, особливо на низьких частотах.

Для створення широкого звуку при синтезі, крім затримки, часто використовується розлад голосів (detune). Для того щоб створити широкий звук необхідно вибрати більше одного голосу і трохи зсунути їх один відносно одного. Чим більше голосів і рівень розладу тим більш розмитий звук. Подібні обробки реалізовані в Ambisonic-плагінах, що входять до складу DAW-програм.

Для регулювання джерела по висоті застосовують еквайзери і автоматизацію їх параметрів в часі. Найчастіше застосовують параметричні еквайзери з регулюванням центральної частоти, коефіцієнта передачі і добротності. Дуже дієвим інструментом є ефект зміни висоти тону Pitch shifter без зміни тривалості звучання. Найчастіше така обробка здійснюється в частотній області, де спектр перетворюється так, щоби зсунути частоту основного тону, а потім, щоби зберегти тривалість здійснюється ресемплінг і зворотне перетворення Фур'є. Такий метод дає натуральне звучання при коефіцієнтах зсуву $\pm 25\%$.

Для позиціонування джерела по глибині крім банального рівня застосовують ревербератори. Розглянуто принципи алгоритмічної реверберації на основі гребінчастих і всепропускних фільтрів зі зворотним зв'язком. Встановлено відповідність між характерними налаштуваннями ревербераторів і параметрами ревербераційних фільтрів, тобто затримками, фільтрами, множниками і т.д.

Передовим методом реверберації є конволюційний. Він побудований на основі згортки сигналу з відомою імпульсною характеристикою будь-якого приміщення. В Інтернеті є великі колекції імпульсних відгуків різних відомих концертних залів і не дуже відомих приміщень.

Гібридний ревербератор, що поєднує алгоритмічний і конволюційний методи, реалізовано в Ableton Live. Він має власну колекцію імпульсних відгуків, а також дозволяє завантажити власний семпл відгуку. Розглянуті принципи роботи і налаштування даного ревербератора.

3 ПРАКТИЧНІ ПРИЙОМИ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ ПРИ ЗВЕДЕННІ І МАЙСТЕРИНГУ

3.1 Створення широкого звуку при записі

Якщо працюємо з живим звуком гарним варіантом буде розвести різні дублі по каналах. Справа в тому, що співак або музикант не можуть виконати одну і ту ж партію двічі поспіль однаково. Дублі завжди будуть трішки різними (рис.3.1).

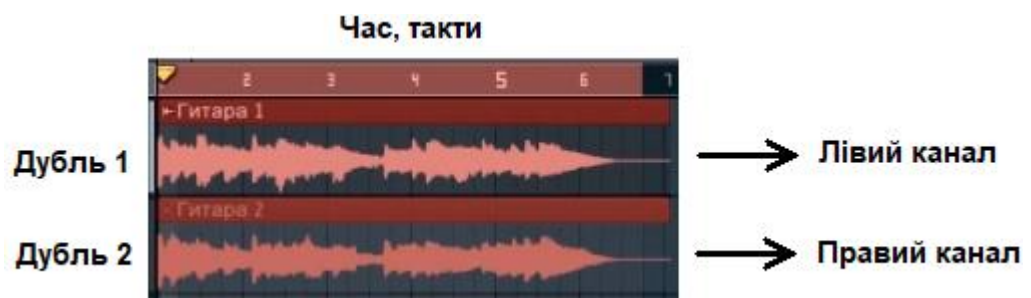


Рисунок 3.1 – Розведення дублів по каналах

В різних дублях відрізняється тембр, і присутні деякі неточності у виконанні, тому і виходить ефект розширення звучання.

Дві доріжки можна отримати як в двох дублях, так і в процесі запису двома мікрофонами (рис.3.2).



Рисунок 3.2 – Процес запису гітари двома мікрофонами

Частини гітари, куди піднесені мікрофони на рис.3.2, звучать по-різному, тому виходить ефект як при розведенні тембрів. Перевага такого способу – повна моносумісність звуку (при правильному записі).

3.2 Розширення стерео ефектом Хааса

Ефект Хааса або ефект пріоритету (ефект маскування) – бінауральний психоакустичний ефект, що складається з двох частин:

– якщо за звуком слідує інший звук, розділений досить короткою часовою затримкою (нижче порога луни слухача), то слухач сприймає їх як одну звукову подію;

– при цьому просторове розташування джерела визначається в основному першим звуком. Тобто, відстаючий звук впливає на місце розташування, проте його ефект пригнічується першим звуком, що надходить.

Цей ефект пояснює, чому локалізація звуку можлива у типовій ситуації, коли звуки відбиваються від стін, меблів тощо, забезпечуючи тим самим численні послідовні стимули.

Злиття відбувається, коли затримка між двома звуками знаходиться в діапазоні від 1 до 5 мс для клацань і до 40 мс для складніших звуків, таких як мова або музика. Якщо затримка довша, то другий звук чується як луна (рис.3.3).

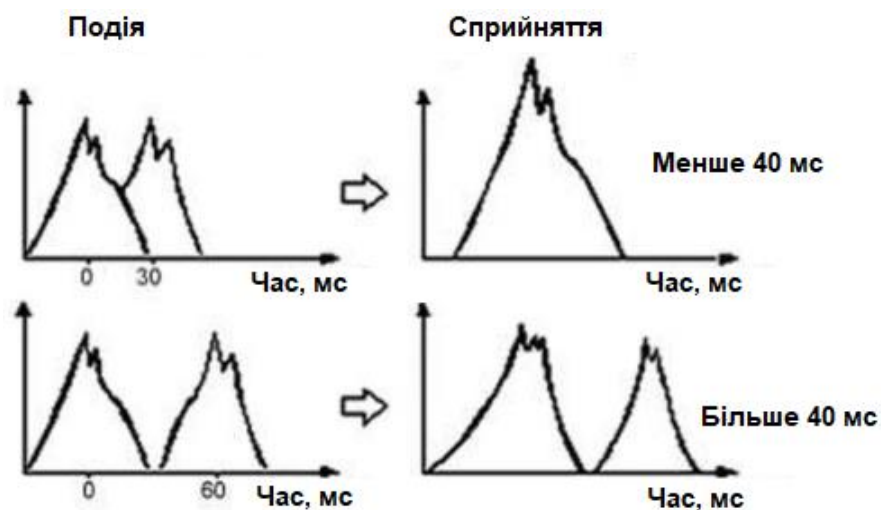


Рисунок 3.3 – Сутність ефекту Хааса

Коли є послідовні звуки, що виходять із джерел у різних місцях, то вони сприймаються як звук однієї події; при цьому при визначенні розташування сприйманого звуку переважає джерело звуку, який першим досяг вух. Друге надходження звуку надає лише невеликий (хоч і вимірний) вплив на місце розташування злитого звуку. Однак, якщо звук, що надходить другим, на 15 дБ голосніше, ніж перший, то ефект пріоритету порушується.

Для розширення ефектом Хааса дублюємо трек по стерео доріжкам, і зсуємо одну доріжку відносно іншої (рис.3.4).



Рисунок 3.4 – Розширення ефектом Хааса

Щодо моно сумісності, то розширення ефектом Хааса підходить не до всіх звуків, тому що відіграє роль фільтру (рис.3.4).

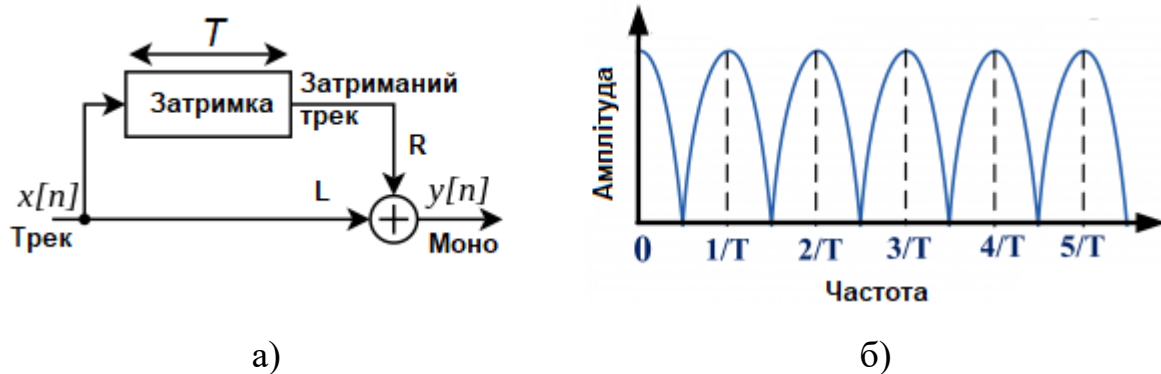


Рисунок 3.5 – Фільтрація в монофонічному каналі при розширенні ефектом Хааса

Отже, як видно з рис. 3.5, б, АЧХ по моноканалу містить нулі на частотах, кратних $T/2$, де T – час зсуву. Тому розширення ефектом Хааса не підходить для тривалих протяжних звуків, але гарно звучить на коротких сплесках (клепи), а також на низькочастотних звуках (бас, бочка), спектр

яких лежить нижче першого нуля в АЧХ. Якщо вважати верхню частоту низькочастотних звуків приблизно $f_{вНЧ} = 300$ Гц, то максимальна затримка в розширенні Хааса не має бути більшою за

$$T = \frac{1}{2f} = \frac{1}{2 \cdot 300} = 1,6 \text{ мс.} \quad (3.1)$$

При більших затримках можлива поява ефекту фленжеру на найвищих нотах басу.

3.3 Розширення стерео розлаштуванням detune

Дана обробка за структурною схемою схожа на ефект Хааса, але замість затримки застосовується зміна висоти тону в одному каналі (detune в синтезаторах, або pitch в звукозаписах, рис. 3.6, а).

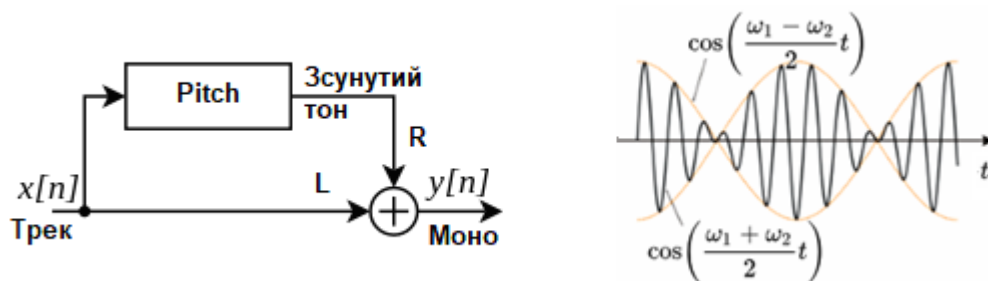


Рисунок 3.6 – Розширення стерео розлаштуванням pitch (а) і виникнення биттів між коливаннями двох частот (б)

Так само, як при розширенні Хааса, при розширенні стерео розлаштуванням потрібно моніторити звук в моно каналі. Тут можливе виникнення биттів між коливаннями двох частот.

Биття виникають від того, що один із двох сигналів лінійно в часі відстає від іншого по фазі, і, в ті моменти, коли коливання відбуваються синфазно, сумарний сигнал виявляється максимальним, а в ті моменти, коли

два сигнали опиняються в протифазі, вони взаємно гасять один одного. Ці моменти періодично змінюють один одного в міру наростання відставання.

Можна вважати, що коливання із частотами f_1 та f_2 замінені коливанням $\cos(2\pi(f_1 + f_2)t/2)$ з частотою, що дорівнює їх середньому арифметичному, причому амплітуда цього коливання повільно змінюється з частотою $(f_1 - f_2)/2$.

3.4 Розширення стерео еквалізацією

Для цього ефекту можна використовувати стереоеквалайзери, розірвавши зв'язок між АЧХ каналів. При цьому стереоеквалайзер перетворюється на два незалежних еквалайзера (рис.3.7).

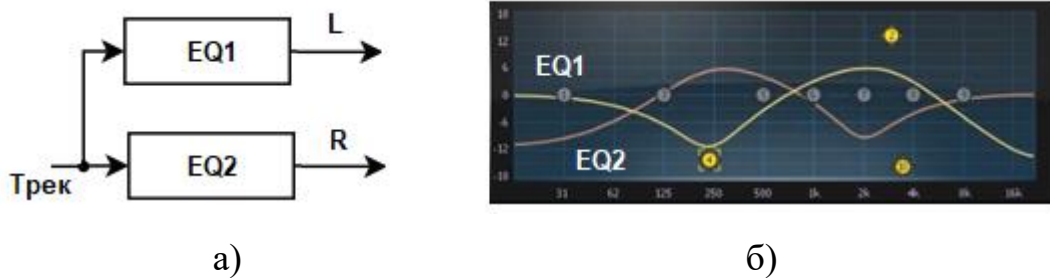


Рисунок 3.7 – Розширення стерео еквалізацією (а) і приклад АЧХ еквалайзерів (б)

АЧХ еквалайзерів налаштовуються таким чином, щоби одні частоти були більше в одному каналі, інші – в іншому. При цьому відбувається розширення звуку.

Часто в плагінах зазначають характеристику виду Розширення (розкид АЧХ по каналах) – Частота (рис. 3.7). Чим більше відмінність АЧХ, тим більше розширення стереобазиса.

Даний метод характеризується повною моно сумісністю, тому що для АЧХ еквалайзерів справедливе співвідношення:

$$K_1(f) + K_2(f) = 1. \quad (3.2)$$

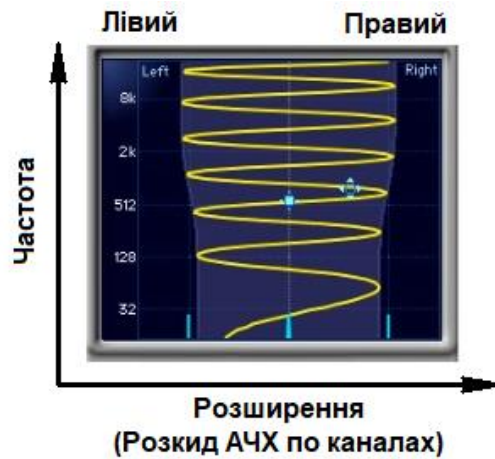


Рисунок 3.7 – Характеристика плагіна розширення стерео еквалізацією

Отже АЧХ моно каналу залишається рівномірною.

Даним способом погано розширюються тривалі звуки. Слух встигає вловити, що частоти розподіляються по каналах, і результат звучить дивно. Отже, метод підходить для коротких звуків, а для тривалих допустимо невелика ступінь розширення.

3.5 Mid-side обробка

Mid-side є альтернативним способом представлення стереосигналів. Нехай є два стереоканали – лівий і правий (L і R). З них можна сформувати ще два сигнали – сумарний Mid і різницевий Side:

$$Mid = L + R, \quad Side = L - R. \quad (3.3)$$

Сигнал Mid (середній) фактично є моно сигналом і звучить по середині просторової звукової картини (рис.3.8, червона лінія).

Сигнал Side (боковий) є стереофонічною складовою сигналу, тією, що відрізняє лівий канал від правого, і відповідає за ширину просторової картини (рис.3.8, синя лінія).

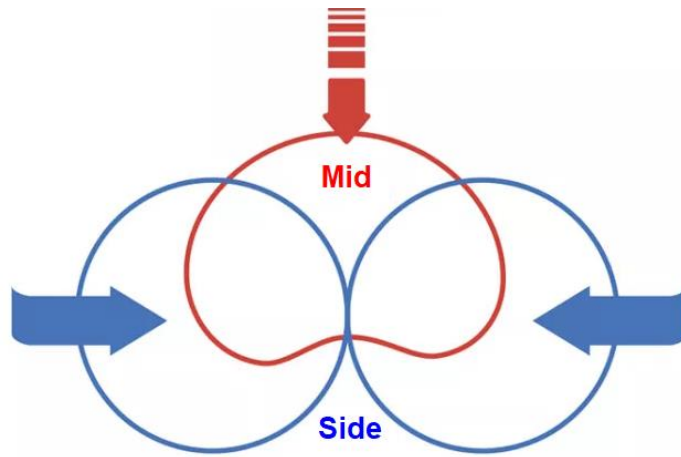


Рисунок 3.8 – Просторове представлення Mid і Side складових

Отже, ширину стерео-поля можна змінити варіюючи кількість бічного каналу в міксі (рис.3.9).

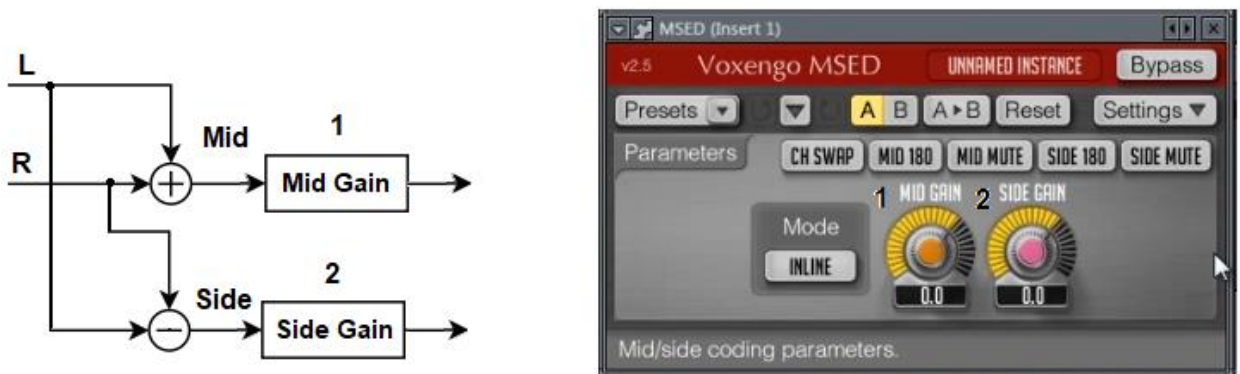


Рисунок 3.9 – Структурна схема Mid-side обробки (а) і плагін Mid-side обробки (б)

Після роздільної обробки Mid і Side складових можна знову отримати сигнали лівого і правого каналів:

$$L = \frac{Mid + Side}{2}, \quad R = \frac{Mid - Side}{2}. \quad (3.4)$$

Якщо така обробка частотно-незалежна, це дає повну моноsumісність.

Розглянемо алгоритми роботи зі звуком, коли треба забезпечити стерео розширення панорами, або стерео звуження.

Алгоритм розширення стерео показаний на рис.3.10.

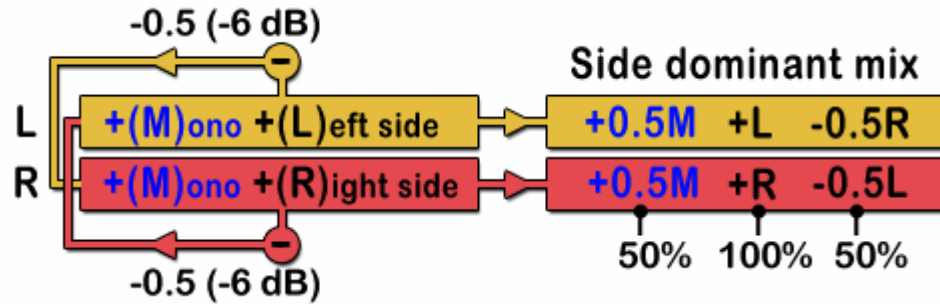


Рисунок 3.10 – Алгоритм розширення стерео

Діаграма (рис.3.10) показує, що сталося алгебраїчно:

$$\text{лівий канал} = [(M+L)-(0,5 M + 0,5R)] = [L - 0,5R - 0,5 M]$$

$$\text{правий канал} = [(M + R)-(0,5 M + 0,5L)] = [R - 0,5L - 0,5 M]. \quad (3.5)$$

Звертає увагу, що "Mid" (центр панорами) звуку на 0,5 (50%) від їх початкового рівня, що більш важливо, L і R (бічні) сигнали все ще знаходяться на 100%, тепер в 2 рази голосніше, ніж моно (у центрі) міксу. Іншими словами ми збільшили сайд складову (стерео ефект).

Алгоритм видалення центрально спанорамованих звуків показаний на рис.3.11.

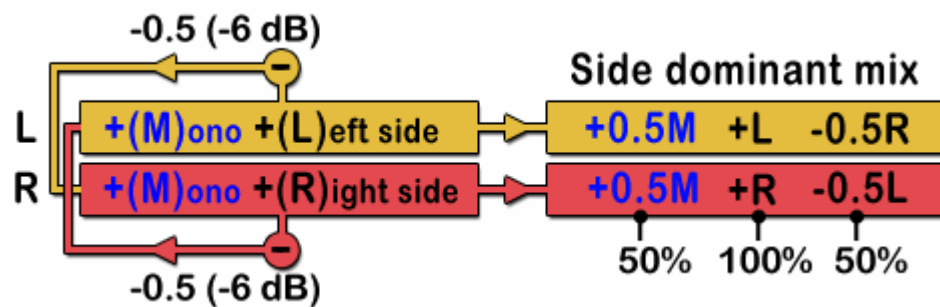


Рисунок 3.11 – Алгоритм видалення центрально спанорамованих звуків

Алгебраїчно

$$\text{лівий канал} = (M+L)-(M+R) = L-R$$

$$\text{правий канал} = (M+R)-(M+L) = R-L.$$

При цьому перехресному змішуванні "моно" все ще звучатиме, але це видаляє звуки, які спочатку були спільними для обох каналів (середньо змішані звуки).

"Видалення центрально спанорамованих звуків" часто представляється як "вокальні екстрактори". Якщо припустити, що вокал спанорамований точно в центрі між колонками і він не містить стерео ефектів (реверберації, пінг-понг діля і т.п.) і музика в основному набуде стерео, інструменти спанорамовані навколо стерео поля, то теоретично має бути можна відокремити MID (вокал) від SIDE (музики). Так звучить в теорії, але майже завжди це зазнає невдачі на практиці, тому що стерео-ефекти, що видаляються разом з вокалом, і вокал перетинається з інструментами.

3.6 Висновки по розділу 3

В розділі 3 детально розібрані конкретні методи прийоми просторової обробки звуку при зведенні і майстерингу. Одною з задач в сучасній аудіоіндустрії є отримання широкого звуку з яскраво вираженим стереоефектом. При цьому розширення стерео панорами може призвести до поганої моно сумісності треку, тобто в моно варіанті він може звучати значно гірше, ніж в стерео.

Найкращим способом є створення широкого звуку при записі. Якщо працюємо з живим звуком гарним варіантом буде розвести різні дублі по каналах. Справа в тому, що співак або музикант не можуть виконати одну і ту ж партію двічі поспіль однаково. Дублі завжди будуть трішки різними, тому і виходить ефект розширення звучання. Доріжки можна отримати як в двох дублях, так і в процесі запису двома мікрофонами, розташованими в різних місцях відносно джерела звуку. Перевага такого способу – повна моносумісність звуку.

Розширити стерео також можна ефектом Хааса. Якщо за звуком слідує інший звук, розділений затримкою менше 50 мс, то слухач сприймає їх як

одну звукову подію. При цьому просторове розташування джерела визначається в основному першим звуком. Для розширення стерео дублюємо трек по доріжкам, і зсуваємо одну доріжку відносно іншої.

Щодо моно сумісності, то розширення ефектом Хааса підходить не до всіх звуків, тому що відіграє роль гребінчастого фільтру. розширення ефектом Хааса не підходить для тривалих протяжних звуків, але гарно звучить на коротких сплесках (клепи), а також на низькочастотних звуках (бас, бочка), спектр яких лежить нижче першого нуля в АЧХ.

Розширення стерео розлаштуванням схоже на ефект Хааса, але замість затримки застосовується зміна висоти тону в одному каналі. Так само, як при розширенні Хааса, при розширенні стерео розлаштуванням потрібно моніторити звук в моно каналі. Тут можливе виникнення биттів між коливаннями двох частот.

Розширення стерео можна використовувати стереоеквалайзери, розірвавши зв'язок між АЧХ каналів. При цьому стереоеквалайзер перетворюється на два незалежних еквалайзера. АЧХ еквалайзерів налаштовуються таким чином, щоби одні частоти були більше в одному каналі, інші – в іншому. При цьому відбувається розширення звуку. Даний метод характеризується повною моно сумісністю, тому що АЧХ еквалайзерів доповнюють одна одну і АЧХ моно каналу залишається рівномірною.

Mid-side обробка є альтернативним способом представлення стерео сигналів. З лівого і правого стереоканалів можна сформувати ще два сигнали – сумарний Mid і різницевий Side. Сигнал Mid (середній) фактично є моно сигналом і звучить по середині просторової звукової картини. Сигнал Side (боковий) є стереофонічною складовою сигналу, тією, що відрізняє лівий канал від правого, і відповідає за ширину просторової картини. Отже, ширину стерео-поля можна змінити варіюючи кількість бічного каналу в міксі. Якщо така обробка частотно-незалежна, це дає повну моносумісність.

ВИСНОВКИ

Музична спільнота давно експериментує із просторовим звучанням. Просторове аудіо дозволяє сформувати відчуття справді об'ємної сцени, звучання з усіх напрямків чи, навпаки, з якогось одного конкретного. Історія концепції бере початок ще в середині XVI ст. Тоді фламандський композитор Адріан Вілларт популяризував новий стиль хорового співу з розстановкою виконавців з боків церковної зали та їх поперемінним включенням. У результаті музика «обволікала» парафіян з усіх боків.

Сьогодні з просторовим звучанням експериментують окремі муз. колективи. Ще 2017-го американський рок-гурт R.E.M. випустив ре-реліз альбому 1992 року «Automatic For The People» у багатовимірному акустичному форматі. Пізніше аналогічні роботи вийшли в Олівії Родріго, Аріани Гранде та Тейлор Свіфт.

Отже просторове відчуття відіграє суттєву роль в сприйнятті звукового контенту слухачем. Звукорежисер при зведенні і майстерингу звуку має враховувати всі просторові ефекти.

Метою кваліфікаційної роботи є аналіз методів і прийомів просторової обробки звукових треків при зведенні і майстерингу звуку і формулювання рекомендацій з просторової обробки для робітників звукової індустрії, студентів та випускників відповідних навчальних закладів.

В першому розділі визначені явища, що беруть участь в формуванні просторового сприйняття звуку людиною. При визначенні азимутального напрямку на джерело має значення ефект різниці часу приходу. Він грає роль на частотах приблизно від 300 Гц до 4 кГц. Далі ефект різниці часу приходу зменшується, тому що часовий зсув значно перевищує період коливання.

На перехідному етапі біля 4 кГц все більший вклад у просторове сприйняття починає мати різниця інтенсивностей звуку за рахунок ефекту екранування головою. Максимальний ефект від інтенсивності триває до частот 6...6,5 кГц, після 8 кГц даний ефект майже не впливає на просторове

сприйняття, тому що на перший план виходить різниця в спектральному складі звука зліва і справа.

Істотне значення для локалізації має також енергія перехідних процесів. Тому при прослуховуванні музичних і мовних сигналів зміна спектрального складу сигналу, отже, та її тембру, залежно з його розташування, допомагає у локалізації.

Здатність визначати напрямок приходу звуку у вертикальній площині у людини розвинена значно слабше, ніж у горизонтальній: $10...15^\circ$ у порівнянні з 3° в горизонтальній. Цю здатність зв'язують з орієнтацією і формою вушних раковин: АЧХ буде різною при надходженні звуку спереду-зверху і ззаду. Отже динамічна зміна тембра доріжки може викликати відчуття переміщення джерела по вертикалі. Такі приклади є в сучасній музиці.

На відчуття глибини і загальне просторове відчуття крім гучності впливає час приходу ранніх відбиттів і загальна структура ревербераційного хвоста. Різні стилі музики потребують різних його значень. Звукорежисер, повинен мати на увазі цей параметр, інакше буде невідповідність стилю музики розміру приміщення (наприклад, звучання органу в маленькій кімнаті), що чітко відчувається слухачами.

Можна виділити три площини позиціонування звуку: ширина (ліворуч, праворуч, по центру); висота (вище, нижче); глибина (ближче, далі).

В другому розділі проведено теоретичний аналіз методів обробки для позиціонування окремих треків композиції в просторі.

Для позиціонування джерела по ширині в простішому випадку використовують амплітудне панорамування. Розглянуті синусно-косинусний, синусний та тангенціальний закони амплітудного панорамування. Результати показали, що вищеописані способи не відрізняються високою точністю. Наприклад, у разі тангенціального закону некоректно локалізуються сигнали в діапазоні від 1 кГц до 2 кГц. А для синусно-

косинусного закону широкосмугові сигнали локалізуються ширше за потрібне положення.

Саме тому зараз доцільно використовувати більш точні методи, доповнені зміною фази і розстройкою висоти тону. Важливим інструментом створення широкого міксу є фазове панорамування. Цей прийом часто використовується для синтезу. Фазова затримка використовується у методиці створення широкого звучання на основі дабл-треку. Однак у цьому випадку слід стежити за фазовими спотвореннями, які мають місце, особливо на низьких частотах.

Для створення широкого звуку при синтезі, крім затримки, часто використовується розлад голосів (detune). Для того щоб створити широкий звук необхідно вибрати більше одного голосу і трохи зсунути їх один відносно одного. Чим більше голосів і рівень розладу тим більш розмитий звук. Подібні обробки реалізовані в Ambisonic-плагінах, що входять до складу DAW-програм.

Для регулювання джерела по висоті застосовують еквайзери і автоматизацію їх параметрів в часі. Найчастіше застосовують параметричні еквайзери з регулюванням центральної частоти, коефіцієнта передачі і добротності. Дуже дієвим інструментом є ефект зміни висоти тону Pitch shifter без зміни тривалості звучання. Найчастіше така обробка здійснюється в частотній області, де спектр перетворюється так, щоби зсунути частоту основного тону, а потім, щоби зберегти тривалість здійснюється ресемплінг і зворотне перетворення Фур'є. Такий метод дає натуральне звучання при коефіцієнтах зсуву $\pm 25\%$.

Для позиціонування джерела по глибині крім банального рівня застосовують ревербератори. Розглянуто принципи алгоритмічної реверберації на основі гребінчастих і всепропускних фільтрів зі зворотним зв'язком. Встановлено відповідність між характерними налаштуваннями ревербераторів і параметрами ревербераційних фільтрів, тобто затримками, фільтрами, множниками і т.д.

Передовим методом реверберації є конволюційний. Він побудований на основі згортки сигналу з відомою імпульсною характеристикою будь-якого приміщення. В Інтернеті є великі колекції імпульсних відгуків різних відомих концертних залів і не дуже відомих приміщень.

Гібридний ревербератор, що поєднує алгоритмічний і конволюційний методи, реалізовано в Ableton Live. Він має власну колекцію імпульсних відгуків, а також дозволяє завантажити власний семпл відгуку. Розглянуті принципи роботи і налаштування даного ревербератора.

В розділі 3 детально розібрані конкретні методи прийоми просторової обробки звуку при зведенні і майстерингу. Одною з задач в сучасній аудіоіндустрії є отримання широкого звуку з яскраво вираженим стереоефектом. При цьому розширення стерео панорами може призвести до поганої моно сумісності треку, тобто в моно варіанті він може звучати значно гірше, ніж в стерео.

Найкращим способом є створення широкого звуку при записі. Якщо працюємо з живим звуком гарним варіантом буде розвести різні дублі по каналах. Справа в тому, що співак або музикант не можуть виконати одну і ту ж партію двічі поспіль однаково. Дублі завжди будуть трішки різними, тому і виходить ефект розширення звучання. Доріжки можна отримати як в двох дублях, так і в процесі запису двома мікрофонами, розташованими в різних місцях відносно джерела звуку. Перевага такого способу – повна моносумісність звуку.

Розширити стерео також можна ефектом Хааса. Якщо за звуком слідує інший звук, розділений затримкою менше 50 мс, то слухач сприймає їх як одну звукову подію. При цьому просторове розташування джерела визначається в основному першим звуком. Для розширення стерео дублюємо трек по доріжкам, і зсуваємо одну доріжку відносно іншої.

Щодо моно сумісності, то розширення ефектом Хааса підходить не до всіх звуків, тому що відіграє роль гребінчастого фільтру. розширення ефектом Хааса не підходить для тривалих протяжних звуків, але гарно

звучить на коротких сплесках (клепи), а також на низькочастотних звуках (бас, бочка), спектр яких лежить нижче першого нуля в АЧХ.

Розширення стерео розлаштуванням схоже на ефект Хааса, але замість затримки застосовується зміна висоти тону в одному каналі. Так само, як при розширенні Хааса, при розширенні стерео розлаштуванням потрібно моніторити звук в моно каналі. Тут можливе виникнення биттів між коливаннями двох частот.

Розширення стерео можна використовувати стереоеквалайзери, розірвавши зв'язок між АЧХ каналів. При цьому стереоеквалайзер перетворюється на два незалежних еквалайзера. АЧХ еквалайзерів налаштовуються таким чином, щоби одні частоти були більше в одному каналі, інші – в іншому. При цьому відбувається розширення звуку. Даний метод характеризується повною моно сумісністю, тому що АЧХ еквалайзерів доповнюють одна одну і АЧХ моно каналу залишається рівномірною.

Mid-side обробка є альтернативним способом представлення стерео сигналів. З лівого і правого стереоканалів можна сформувати ще два сигнали – сумарний Mid і різницевий Side. Сигнал Mid (середній) фактично є моно сигналом і звучить по середині просторової звукової картини. Сигнал Side (боковий) є стереофонічною складовою сигналу, тією, що відрізняє лівий канал від правого, і відповідає за ширину просторової картини. Отже, ширину стерео-поля можна змінити варіюючи кількість бічного каналу в міксі. Якщо така обробка частотно-незалежна, це дає повну моносумісність.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Bartholomew Elias. Sound Basics: A Primer in Psychoacoustics. – United States Air Force Research Laboratory, 1998. – 198 p.
2. Ballou G. Handbook for Sound Engineers (Fourth ed.). – Burlington: Focal Press, 2008. – 43 p.
3. Christopher J. Plack. The Sense of Hearing. Lawrence Erlbaum Associates, 2005. – 267 p.
4. Carhart R. The usefulness of the binaural hearing aid / J. Speech and Hear. Dis. February. – 1958. – p.171-182.
5. 3. Von Békésy G. Experiments in Hearing. NY: McGraw-Hill, 1960. – 322 p.
6. Alec Nisbett. Sound Studio: Audio techniques for Radio, Television, Film and Recording. 7th Edition, 2004. – 400 p.
7. Walter Fischer. Digital video and audio broadcasting technology. A practical engineering guide. Third Edition. Shpringer, 2010. – 828 p.
8. Michael C. Keith. The radio station. 6th ed. Burlington, MA: Elsevier/Focal Press, 2004. – 188 p.
9. Complete broadcasting industry guide: television, radio, cable & streaming. Amenia, NY: Grey House Publishing, 2020. – 732 p.
10. Mohammed S. Nick, Global radio: from shortwave to streaming. Lanham, Maryland : Lexington Books, 2019. – 137 p.
11. Amanda D. Lotz. The television will be revolutionized. Second edition. New York : New York University Press, 2014. – 331 p.
12. Radio's second century : past, present, and future perspectives / edited by John Allen Hendricks. New Brunswick, New Jersey: Rutgers University Press, 2020. – 301 p.
13. The Routledge companion to radio and podcast studies / edited by Mia Lindgren and Jason Loviglio. Abingdon, Oxon ; New York, NY: Routledge, 2022. – 387 c.

14. В.Н. Олейников, О.В. Зубков, В.М. Карташов, И.В. Коротцев, С.И. Бабкин, С.А. Шейко, И.С. Селезнев. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению. Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 199. – С. 29 – 37.

15. V. Kartashov, V. Oleynikov, I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin, I. Selieznov. Use of Acoustic Signature for Detection, Recognition and Direction Finding of Small Unmanned Aerial Vehicles. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2020. 4 p.

16. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Koryttsev I.V., Babkin S. I., Sheiko S.A., Kolendovskaya M.M. Spatial-temporal Processing of acoustic Signals of Unmanned Aerial Vehicles/ Telecommunications and Radio Engineering. – New York. – 2020. – Vol. 79, №9. – P.769-780.

17. V. Kartashov, V. Oleynikov, I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin. Processing of Wide Band Acoustic Signals During Detection of Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, 2020. Volume 1 on 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). pp. 35-39.

18. V.M. Kartashov, G.I. Sidorov, S.A. Sheiko, M.M. Kolendovskaya, O.Yu. Sergienko. Principles of construction and assessment of technical characteristics of multi-frequency atmospheric sodar in the humidity measurement mode. Telecommunications and Radio Engineering. Vol. 79. N.4. 2020. – pp. 323-333.

19. S. Sheiko. Study of the method for assessing atmospheric turbulence by the envelope of sodar signals // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2/5 (92). – April, 2018. – p. 33–40.

20. Сідоров Г.І., Шейко С.О., Шаповалов С.В., Полонська А.С., Дмитренко А.І. Акустичний метод вимірювання турбулентного стану атмосферного прикордонного шару // Радиотехніка: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2018. – Вип. 192. – С. 46–50.

21. Valerii V. Semenets, V. M. Kartashov, V. I. Leonidov. Registration of refraction phenomenon in the problem of acoustic sounding of atmosphere in airports zone. *Telecommunications and Radio Engineering*. Volume 77, Issue 5, 2018. – P. 461-468.

22. Бабак К.В. Технічні аспекти створення електронної музичної композиції // 27-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2023. – с. 57-58.

23. Свірідок М.С. Технічні аспекти створення музичної композиції // 27-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2023. – с. 104-105.

24. Курдиш В.В. Алгоритм синхронізації звуку і відео в інтерв'ю // 27-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2023. – с. 129-130.

25. Древальський Р.В. Дослідження методу корекції звуку для компенсації впливу приміщення /25-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2021. – с. 119-120.

26. Удовік Д.В. Дослідження методів зменшення еквівалентної реверберації в звукозаписі: кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2022 р. – 65 с.

27. Тарусін В.Ю. Дослідження методів компенсації спотворень в звукових трактах: кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2022 р. – 78 с.

28. Мезенцев І.О. Дослідження алгоритмів автоматизованої еквалізації звукозапису голосу: кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2022 р. – 69 с.

29. Pulkki V. Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning // *The Journal of the Audio Engineering Society*. 1997. № 45 (6). P. 345-466.

30. Griesinger D. Stereo and Surround Panning in Practice //

DavidGriesinger.com. Cambridge (MA). 2002. [Електронний ресурс]. URL: http://www.davidgriesinger.com/pan_laws.pdf (дата звернення: 11.12.2023).

31. Bauer B. B. Phasor Analysis of Some Stereophonic Phenomena // The Journal of the Acoustical Society of America. 1961. № 33. – P. 1536-1539.

32. Blumlein A. D. British Patent Specification 394,325 (Improvements in and Relating to Sound-Transmission, Sound-Recording and Sound-Reproducing Systems) // The Journal of the Audio Engineering Society. 1958. № 6. – P. 91-98.

33. Clark H. A. M., Dutton G. F., Vanderlyn P. B. The "Stereosonic" Recording and Reproducing System // The Journal of the Audio Engineering Society. 1958. № 6. – P. 102-117.

34. Імпульсні відгуки від Waves. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.waves.com/downloads/ir-convolution-reverb-library> (дата звернення: 11.12.2023).

35. Імпульсні відгуки концертного залу Promenadikeskus, Фінляндія. [Електронний ресурс]. URL: <http://legacy.spa.aalto.fi/projects/poririrs/> (дата звернення: 11.12.2023).

36. Імпульсні відгуки Bricasti M7: Wave files, 32 bit, 44.1 Khz. [Електронний ресурс]. URL: <https://gumroad.com/l/m77> (дата звернення: 11.12.2023).