

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)

Тестування алгоритмів і плагінів для реверберації звука  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи СТМм-22-2  
Семенов Д.О.  
(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 ас. Желанов 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 Семенову Денису Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Тестування алгоритмів і плагінів для реверберації звука.

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 Провести теоретичний аналіз процесу реверберації звуку та впливу різних факторів на цей процес. Визначити фактори, що найбільше впливають на слухове сприйняття реверберації. Розглянути принцип дії механічних, алгоритмічних та загорткових ревербераторів. Розробити загальну схему цифрового ревербератора. Знайти відповідні регулювання і показано, як вони впливають на звуковий сигнал і на загальний характер звучання. Провести експериментальне дослідження алгоритмів реверберації звуку. Отримати спектрограми імпульсних характеристик ревербераторів. Розробити загальну методику використання ревербераторів при створенні гіпотетичної естрадної композиції.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

Вступ

1 Теоретичний аналіз процесу реверберації звуку та впливу різних факторів на цей процес.

2 Теоретичне обґрунтування алгоритмів створення штучної реверберації.

3 Експериментальне дослідження алгоритмів реверберації звуку.

Висновки

Перелік посилань

Додатки

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

1. Створення просторової картини (1 слайд).
2. Мета роботи (1 слайд).
3. Імпульсний відгук приміщення (1 слайд).
4. Листові та пружинні ревербератори (1 слайд).
5. Алгоритмічні ревербератори (1 слайд).
6. Загальна схема ревербератора (1 слайд).
7. Класифікація алгоритмів реверберації (1 слайд).
8. Імпульсні характеристики (1 слайд).
9. Спектрограми імпульсних характеристик (1 слайд).
10. Методика використання ревербераторів (1 слайд).
11. Згорткова реверберація (1 слайд).
12. Записи імпульсної характеристики (1 слайд).
13. Сигнали до і після згортки (1 слайд).
14. 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 алгоритмів реверберації	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  Денис СЕМЕНОВ

Керівник роботи  Олексій ЖЕЛАНОВ

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 65 сторінок, 28 рисунків, 6 таблиць, 35 джерел.

АЛГОРИТМ, ГЛИБИНА, ЗГОРТКА, РЕВЕРБЕРАТОР,  
ПЕРЕДЗАТРИМКА, ПРЯМИЙ ЗВУК, РАННІ ВІДБИТТЯ,  
РЕВЕРБЕРАЦІЙНИЙ ХВІСТ, ЧАС РЕВЕРБЕРАЦІЇ

Мета роботи – на основі теоретичного аналізу процесу реверберації і ревербераційних алгоритмів запропонувати практичну методику вибору ревербераційного алгоритму у контексті зведення музичного матеріалу, виходячи з цілей та завдань позиціонування джерел звукового сигналу у фонограмі.

В роботі проведено теоретичний аналіз процесу реверберації звуку та впливу різних факторів на цей процес. Визначено фактори, що найбільше впливають на слухове сприйняття реверберації. Розглянуто принцип дії механічних, алгоритмічних та загорткових ревербераторів. Розроблено загальну схему сучасного цифрового ревербератора. Порівняно структурну схему з вікном налаштувань цифрового програмного ревербераторів. Знайдено відповідні регулювання і показано, як вони впливають на звуковий сигнал і на загальний характер звучання. Проведено експериментальне дослідження алгоритмів реверберації звуку. Отримано спектрограми імпульсних характеристик ревербераторів. Розроблено загальну методику використання ревербераторів при створенні гіпотетичної естрадної композиції.

## ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 65 pages, 28 figures, 6 tables, 35 sources.

ALGORITHM, DEPTH, CONVOLVE, REVERBER, PRE-DELAY, DIRECT SOUND, EARLY REFLECTIONS, REVERB TAIL, REVERB TIME

The purpose of the work is to propose a practical technique for choosing a reverberation algorithm in the context of mixing musical material, based on the goals and objectives of positioning sound signal sources in the phonogram, based on the theoretical analysis of the reverberation process and reverberation algorithms.

The paper provides a theoretical analysis of the sound reverberation process and the influence of various factors on this process. The factors that have the greatest influence on the auditory perception of reverberation have been determined. The principle of operation of mechanical, algorithmic and envelope reverberators is considered. A general scheme of a modern digital reverberant has been developed. The structural diagram is compared with the settings window of the digital software reverberators. The appropriate adjustments are found and shown how they affect the sound signal and the general character of the sound. An experimental study of sound reverberation algorithms was conducted. Spectrograms of impulse characteristics of reverberators were obtained. To develop a general method of using reverberators when creating a hypothetical pop composition.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	9
<b>1 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РЕВЕРБЕРАЦІЇ ЗВУКУ ТА ВПЛИВУ РІЗНИХ ФАКТОРІВ НА ЦЕЙ ПРОЦЕС.....</b>	<b>11</b>
1.1 Сутність ефекту реверберації.....	11
1.2 Критерії визначення часу реверберації.....	12
1.3 Розрахунок часу реверберації за формулою Себіна.....	15
1.4 Розрахунок часу реверберації за формулою Ейрінга.....	17
1.5 Розрахунок часу реверберації за формулою Мілінгтона.....	20
1.6 Вплив кліматичних умов на час реверберації.....	21
1.7 Висновки по розділу 1.....	25
<b>2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ АЛГОРИТМІВ СТВОРЕННЯ ШТУЧНОЇ РЕВЕРБЕРАЦІЇ.....</b>	<b>27</b>
2.1 Історія штучної реверберації.....	27
2.2 Цифрові ревербератори.....	30
2.3 Вплив реверберації на просторові характеристики об'єктів звукової сцени.....	35
2.4 Висновок по розділу 2.....	40
<b>3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ РЕВЕРБЕРАЦІЇ ЗВУКУ.....</b>	<b>42</b>
3.1 Критерії поділу моделей реверберації.....	42
3.2 Дослідження алгоритмічних методів штучної реверберації.....	44
3.3 Дослідження згорткового методу штучної реверберації.....	51
3.4 Висновки по розділу 3.....	55
Висновки.....	57
Перелік посилань.....	62

ДОДАТКИ.....	66
Додаток А. Графічний матеріал.....	67
Додаток Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....	81

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- AЧХ – 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

Незважаючи на те, що стереофонічні системи існують вже тривалий час і не є безпосереднім інструментом для створення повноцінного тривимірного акустичного простору, їх актуальність на сьогодні складно переоцінити. Повсюдне використання стереосистем до сьогодні робить їх основним інструментом моніторингу звукорежисера, і абсолютна більшість фонограм створюються з метою бути відтвореними в першу чергу саме на стереофонічних системах.

У сучасній студійній звукозаписній практиці більшість музичних інструментів та голосів фіксується в заглушених приміщеннях у ближньому звуковому полі за допомогою розташування мікрофонів у безпосередній близькості від джерел звуку з метою нівелювання навіть мінімальної природної реверберації приміщення. Той же принцип стосується і синтезованих за допомогою простих (синусоїдальних, трикутних, прямокутних тощо) хвильових форм сигналів. Незважаючи на те, що більшість синтезаторів володіє власними процесорами ефектів, список яких включає реверберацію, культура створення подібного роду звукових ефектів полягає в їх максимальній простоті у зв'язку з тим, що використовуються дані ефекти в першу чергу для збагачення тембру електромюзичного інструменту, а також для боротьби із загальною динамічною та спектральною статикою в загальному характері синтезованого звуку. Глибоке моделювання реверберації, як і інших художніх ефектів обробки, у даному разі виявляється зайвим.

У зв'язку з цим проблема «глибини» фонограми, тобто рознесення у ній джерел звукового сигналу, розташованих у ближньому та дальньому звукових полях залишається актуальною. Одним із способів вирішення даної проблеми є створення у фонограмі штучного дифузного поля, або навіть кількох подібних полів за допомогою застосування різних моделей реверберації.

В даній кваліфікаційній роботі розробляється методика вибору ревербераційного алгоритму у контексті зведення музичного матеріалу, виходячи з цілей та завдань позиціонування джерел звукового сигналу у фонограмі.

Мета роботи – на основі теоретичного аналізу процесу реверберації і ревербераційних алгоритмів запропонувати практичну методику вибору ревербераційного алгоритму у контексті зведення музичного матеріалу, виходячи з цілей та завдань позиціонування джерел звукового сигналу у фонограмі.

# 1 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РЕВЕРБЕРАЦІЇ ЗВУКУ ТА ВПЛИВУ РІЗНИХ ФАКТОРІВ НА ЦЕЙ ПРОЦЕС

## 1.1 Сутність ефекту реверберації

Реверберація супроводжує будь-який звук, що виник у природному акустичному середовищі. Виникає вона при відображенні звукової хвилі від будь-яких перешкод та її повернення до точки прослуховування. Тому, у сприйнятті акустичного звуку є його пряме джерело і численні відображення від найближчих поверхонь перешкод. Графічно це можна так: нехай у певному приміщенні є джерело сигналу і слухач (рис.1.1).

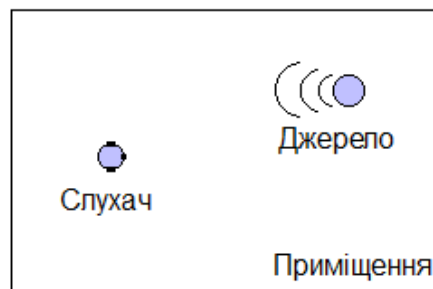


Рисунок 1.1 – Передумови для виникнення реверберації

При подачі короткого звукового імпульсу в точці прослуховування спостерігатиметься приблизно така картина, що зображена на рис.1.2.

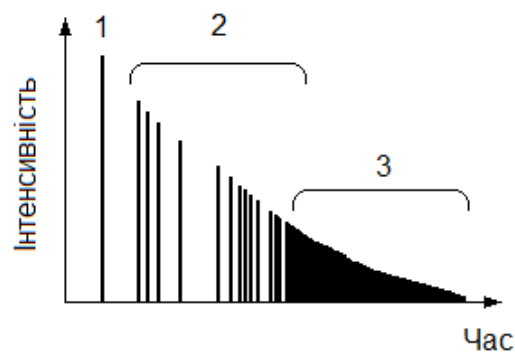


Рисунок 1.2 – Часова структура процесу реверберації: 1 – прямий звук, 2 – ранні відбиття, 3 – суцільний ревербераційний хвіст

Першим (1) надходить прямий сигнал від джерела звуку, що має найбільшу інтенсивність. Слідом за ним приходять ранні або первинні відбиття (2) від стін, підлоги, стелі, що мають меншу інтенсивність, величина якої залежить і від пройденої відстані та від поглинаючих властивостей матеріалів поверхонь. Далі підходять вторинні і численні наступні відбиття (3) з інтенсивністю, що експоненційно зменшується. У реальній ситуації звукові імпульси зазвичай мають довжину більшу, ніж час приходу перших відбиттів, тому реверберація накладається на вихідний звук у його звучання.

Часто до ранніх відбиттів зараховують вторинні відлуння, що відходять від вихідного прямого сигналу не більше ніж на 60 мс.

Ефект реверберації проявляється у більш соковитому гучному об'ємному звучанні, зазвичай приємнішому для сприйняття, ніж вихідний «сухий» звук.

В аудіозаписі реверберація надає почуття глибини простору. Джерело звуків з більш вираженим ефектом реверберації суб'єктивно відчувається розташованим на відстані від слухача.

Реверберація сприймається разом, якщо проміжки між відбитими сигналами менше 100 мс. При збільшенні інтервалу між звуками, що приходять, понад 100 мс суб'єктивне сприйняття людини відзначає вже роздільне відлуння.

Чим більші розміри приміщення і менше поглинаюча здатність поверхонь, тим більша тривалість реверберації.

## 1.2 Критерії визначення часу реверберації

Тривалість процесу реверберації називають часом реверберації ( $T$ ). Протягом цього енергія звуку енергії зменшується у  $10^6$  разів:

$$\frac{W(T)}{W_0} = 10^{-6}, \quad (1.1)$$

звуковий тиск зменшується в  $10^3$  разів:

$$\frac{p_{зв}(T)}{p_{зв,0}} = 10^{-3}, \quad (1.2)$$

а рівень звукового тиску зменшується на 60 дБ

$$\begin{aligned} L_p &= 10 \lg(p_{зв}^2(T)) - \lg(p_{зв}^2(0)) = 10 \lg\left(\frac{p_{зв}(T)}{p_{зв}(0)}\right)^2 = \\ &= 10 \lg\left((10^3)^2\right) = 10 \lg(10^6) = 60 \text{ дБ}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Наведемо приклад. Фортисимо оркестру відповідає рівень звукового тиску

$$L_{p,форте} = 20 \cdot \lg\left(\frac{p_{зв,форте}}{p_0}\right) = 90 \dots 100 \text{ дБ}, \quad (1.4)$$

а піаніссімо –

$$L_{p,піано} = 20 \cdot \lg\left(\frac{p_{зв,піано}}{p_0}\right) = 35 \dots 40 \text{ дБ} \quad (1.5).$$

Середнє значення рівня звукового тиску між цими крайніми значеннями дорівнює

$$\bar{L}_p = \frac{L_{p,форте} + L_{p,піано}}{2} = \frac{90 + 35}{2} \dots \frac{100 + 40}{2} \approx 63 \div 70 \text{ дБ}. \quad (1.6)$$

З кривих чутливості видно, що значення, близькі до 60 дБ, відповідає зменшенню рівня звукового тиску рівня порога чутності (рис. 1.3).

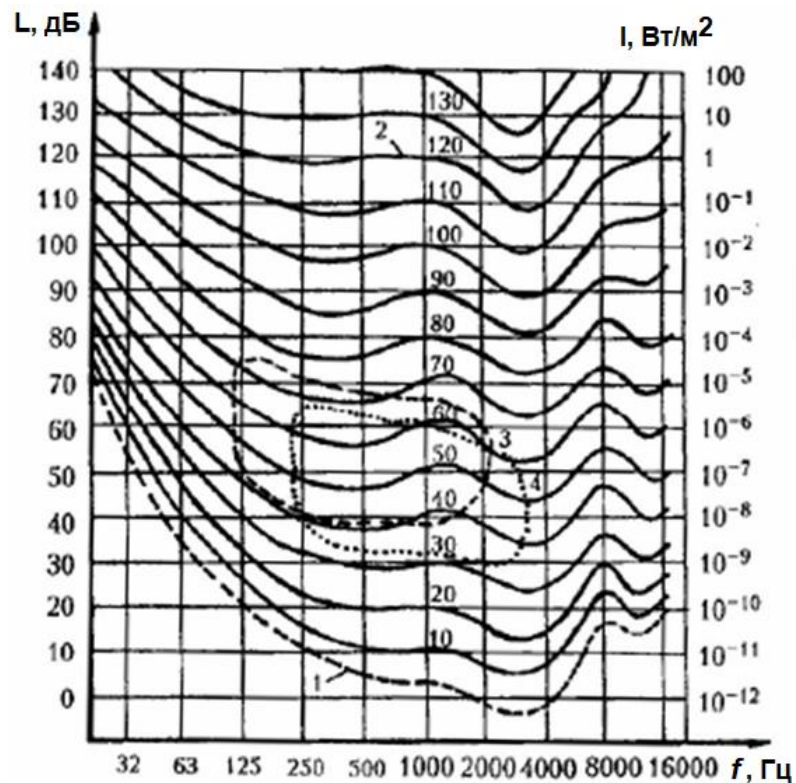


Рисунок 1.3 – Криві рівної гучності для чистого тону:

- 1 – поріг чутності, 2 – больовий поріг, 3 – область звучання чоловічого голосу, 4 – область звучання жіночого голосу

Отже час реверберації приблизно відповідає тривалості зменшення звукового тиску від середнього значення рівня звукового тиску до рівня порога чутності:

$$T \approx t(\bar{L} - L_0). \quad (1.7)$$

Якщо в приміщенні є шуми, то чутний відгук триватиме менше часу реверберації:

$$\tau < T. \quad (1.8)$$

Зазвичай шум рівень шуму щодо порогового становить 40 дБ. Це призводить до того, що час реверберації зменшується більш ніж у 2 рази:

$$\tau < T/2. \quad (1.9)$$

Далі розглянемо формули для обчислення часу реверберації без урахування шумів.

### 1.3 Розрахунок часу реверберації за формулою Себіна

Для експериментального визначення часу реверберації Себін користувався найпростішими пристроями: органними трубами як джерелом звуку та секундоміром. Виявилося, що час реверберації ( $T$ ) прямо пропорційний об'єму приміщення  $V$  і обернено пропорційний добутку середнього коефіцієнта поглинання  $\alpha_{сер}$  і площі всіх перешкод  $S$ :

$$T = k \cdot \frac{V}{\alpha_{сер} \cdot S}. \quad (1.10)$$

Ця формула одержала назву формула Себіна.

Коефіцієнт пропорційності  $k$  має одиницю вимірювання, рівну

$$[k] = \frac{[T] \cdot [\alpha_{сер}] \cdot [S]}{[V]} = \frac{c \cdot 1 \cdot m^2}{m^3} = \frac{c}{m}, \quad (1.11)$$

За вимірюваннями часу реверберації у п'яти різних приміщеннях у формі прямокутного паралелепіпеда, об'єми яких мали значення

$$V \in [96; 1960] \text{ м}^3, \quad (1.12)$$

Себін прийняв експериментальне значення коефіцієнта  $k$  у формулі (1.11), рівним

$$k_{експ} = 0,164 \text{ с/м.} \quad (1.13)$$

При теоретичному виведенні формули для розрахунку часу реверберації було отримано значення

$$k_{теор} = 0,161 \text{ с/м.} \quad (1.14)$$

Обидва значення близькі до

$$k = 1/6 \text{ с/м.} \quad (1.15)$$

За допомогою формули Себіна можна вирішити зворотне завдання: обчислити визначити коефіцієнт поглинання  $\alpha_{сер}$  (або звукопоглинання  $A$ ) деякого матеріалу за вимірним часом реверберації  $T$  в поглинання в "гучній" ревербераційній камері об'ємом  $V$ . Нехай час реверберації звуку в порожній камері дорівнює  $T_0$ . Тоді після внесення до камери досліджуваного матеріалу з площею  $S$  час реверберації зменшується до  $T$ . Отже:

$$\alpha = \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{S} \cdot \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right]. \quad (1.16)$$

Якщо ж площа предмета, що досліджується, не може бути виражена певним числом, то знаходять звукопоглинання поглинання предмета за формулою

$$A = \frac{V}{6} \cdot \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right]. \quad (1.17)$$

Область застосування формули Себіна:

– формула Себіна отримана виведена для ідеального приміщення, в якому існує дифузний, рівномірний розподіл звукової енергії по простору приміщення. Тому слід підставляти значення коефіцієнта поглинання  $\alpha$ , визначені в дифузному полі ревербераційної камери.

– формула Себіна отримана у припущенні, що хвилі падають на перешкоди під будь-якими кутами;

– формула Себіна може бути застосована, якщо звукопоглинаючі матеріали розподілені по поверхнях, що огорожують приміщення, досить рівномірно і можна користуватися поняттям середнього коефіцієнта поглинання;

– формула Себіна заснована на припущенні про безперервне поглинання енергії перешкодами в процесі реверберації. У цьому випадку значення середнього коефіцієнта поглинання звуку перешкодами мале  $\alpha_{сер} \rightarrow 0$ ;

– кількість відбиттів досить велика, і можна знехтувати дискретністю процесу зменшення енергії хвиль, відбитих від перешкод;

– формула Себіна не враховує залежність часу реверберації  $T$  та коефіцієнта  $k$  від форми приміщення;

– експеримент показав, що формулу Себіна можна застосовувати для театральних та концертних залів, навчальних аудиторій та інших приміщень з невеликим  $\alpha_{сер}$ .

#### 1.4 Розрахунок часу реверберації за формулою Ейрінга

Експериментально виявлено, що  $k$  є різним для приміщень різної форми. Виміряні значення  $k$  наведено у табл.1.1.

Залежність  $k$  від форми приміщення відповідає тому, що форма приміщення впливає значення часу реверберації. Причина цього обумовлена залежністю часу реверберації  $T$  від середньої довжини пробігу звукового

променя між двома відбиттями  $l_{сер}$ , яка, у свою чергу, визначається співвідношеннями лінійних розмірів приміщення.

Таблиця 1.1 – Значення  $k$  в залежності від форми приміщення

Форма приміщення	$k$ , с/м
Хрестоподібна у плані, з куполоподібною стелею	0,177
Близька до "золотого перерізу"	0,164
Трапецієподібна у плані (театрального типу)	0,160
Кубічної форми	0,157
Дуже широка у плані, з низькою стелею	0,152

Крім того, звукова енергія поглинається перешкодами не безперервно, а стрибками, у міру досягнення хвилею тієї чи іншої поверхні. Тому рівномірного заповнення енергією всього обсягу приміщення немає, тобто в реальному приміщенні немає дифузного (ізотропного) звукового поля.

Тому більш точні дослідження реверберації, проведені в 1929 р. Шустером і Ветцманом, а в 1930 р. – Карлом Ейрінгом, привели до наступної формули для часу реверберації, названої формулою Ейрінга:

$$T = k \cdot \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_{сер})}, \quad (1.18)$$

Якщо розкласти вираз  $\ln(1 - \alpha_{сер})$  в ряд і залишити в ньому через малу величину  $\alpha_{сер}$  тільки перший доданок

$$\ln(1 - \alpha_{сер}) = -\alpha_{сер} - \frac{1}{2}\alpha_{сер}^2 + \frac{1}{3}\alpha_{сер}^3 - \dots \approx -\alpha_{сер}, \quad (1.19)$$

то при малих значеннях  $\alpha_{сер}$  формула Ейрінга переходить у формулу Себіна:

$$T \approx k \cdot \frac{V}{-S \cdot (-\alpha_{сер})} = k \cdot \frac{V}{\alpha_{сер} \cdot S}. \quad (1.20)$$

Звідси видно, що знак мінус введений у формулі (1.18) введений для того, щоб виключити фізично неможливі негативні значення  $T$ . При цьому весь вираз, що стоїть у знаменнику формули Ейрінга (1.18), є еквівалентом загального поглинання у формулі Себіна (1.20):

$$A = -S \cdot \ln(1 - \alpha_{сер}) = \alpha_{сер} \cdot S. \quad (1.21).$$

Порівнюючи формули Себіна (1.20) та Ейрінга (1.19), отримаємо, що наближення Себіна завищує значення  $T$ . Розбіжність збільшується зі зростанням  $\alpha_{сер}$  (табл.1.2).

Таблиця 1.2 – Завищення значення  $T$  по формулі Себіна

$\alpha_{сер}$	0,2	0,5	0,8
Завищення $T$ , %	11	37	100

При значенні  $\alpha_{сер} \rightarrow 1$  замість реального результату  $T_{реал} \rightarrow 0$  виходить фізично нереальний результат:

$$T = k \cdot \frac{V}{S} = \frac{V}{6 \cdot S}, \quad (1.22)$$

Таким чином, формулу Себіна можна застосовувати при малих значеннях  $\alpha_{сер}$ , а формулу Ейрінга – при будь-яких  $\alpha_{сер}$ .

Наведемо приклад. Для оптимізації акустичних умов у концертних залах рекомендується  $\alpha_{сер} = 0,19$ . Тому можна розраховувати час реверберації за формулою Себіна.

Область застосування формули Ейрінга:

– формула Ейрінга виведена для приміщення з нерівномірним звуковим полем, в якому звукова енергія поглинається перешкодами

стрибкоподібно. Тому слід підставляти значення коефіцієнта поглинання  $\alpha$ , виміряні в плоскому полі, тобто в трубі;

- формула Ейрінга отримана у припущенні, що хвилі падають на перешкоди під кутами, близькими до нормалі;

- формула Ейрінга може бути застосована, якщо звукопоглинаючі матеріали розподілені по поверхнях, що огорожують приміщення, досить рівномірно і можна користуватися поняттям середнього коефіцієнта поглинання;

- формула Ейрінга враховує залежність часу реверберації  $T$  та коефіцієнта  $k$  від форми приміщення;

- формула Ейрінга заснована на припущенні про дискретне поглинання енергії перешкодами в процесі реверберації. У цьому випадку кількість відбиттів мала, а значення середнього коефіцієнта поглинання звуку перешкодами не надто мале  $\alpha_{сер} > 0$ .

- формула Ейрінга припускає, що кількість відбиттів від різних поверхонь з площами  $S_1, S_2, \dots$  однакова;

- формулу Ейрінга можна застосовувати як для приміщень з невеликим  $\alpha_{сер}$  (театральні та концертні зали, навчальні аудиторії), так і для приміщень з порівняно великим значенням  $\alpha_{сер}$  (студії звукозапису, кімнати).

### 1.5 Розрахунок часу реверберації за формулою Мілінгтона

При дуже нерівномірному розподілі загального поглинання результат, обчислений за формулою Ейрінга, може виявитися далеким від виміряного. Мілінгтон пояснив причину цієї розбіжності тим, що насправді ймовірність числа відбиттів від даної поверхні тим більше, чим більше сама поверхня. На підставі цих міркувань Мілінгтон вивів формулу для розрахунку часу реверберації у вигляді

$$T = k \cdot \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1 - \alpha_i)}, \quad (1.23)$$

де  $S_i$  – площа матеріалів з коефіцієнтами поглинання  $\alpha_i$ ,

$n$  – кількість поглинальних матеріалів.

Область застосування формули Міллінгтона:

– недолік формули Міллінгтона полягає в наступному: обчислене значення часу реверберації виходить рівним нулю, якщо хоча б один елемент перешкоди, як би він не був малий, має  $\alpha_i = 1$ . Тому слід вважати, що жоден коефіцієнт поглинання звуку перешкодами не дорівнює одиниці;

– формулу Міллінгтона можна застосовувати для приміщень з будь-яким значенням (крім  $\alpha_{сер} = 1$ );

– формула Міллінгтона справедлива у випадку, коли матеріали огорожувальних поверхонь мають сильно різні  $\alpha_i = 1$ , при цьому самі матеріали розподілені по поверхнях нерівномірно.

## 1.6 Вплив кліматичних умов на час реверберації

Розглянемо вплив вологості повітря на акустику приміщень.

Реверберація звуку із частотою 2...3 кГц

У 1929 р Пауль Себін (двоюридний брат У. Себіна) виявив, що вологість повітря у вимірювальній камері впливає на час реверберації на частотах  $f > 2$  кГц.

Ервін Майер виявив такий самий ефект для частот  $f > 3,2$  кГц.

Точніше вивчення цього явища було зроблено в 1931 р. Верном Кнудсенем. Він визначив:

– поглинання звуку у сухому повітрі більше, ніж у вологому;

– поглинання звуку більших частот більше, ніж низькочастотного;

– у граничному разі, коли відносна вологість стає 100% і з'являється туман, поглинання звуку повітря дуже збільшується на всіх частотах.

Поглинання звуку викликане в'язкістю та теплопровідністю повітря, а також молекулярними втратами. Воно стає помітним на частотах

$$f > 2 \text{ кГц}$$

у приміщеннях великого об'єму

$$V > 2000 \text{ м}^3.$$

З урахуванням цієї обставини формула Ейрінга (1.20) набуває вигляду:

$$T = \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_{cp}) + 4\mu \cdot V}, \quad (1.24)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт загасання звуку у вологому повітрі, одиниця вимірювання  $[\mu] = 1 \text{ м}^{-1}$ .

Значення коефіцієнта загасання визначають графічним методом. Воно зростає зі збільшенням частоти та зменшенням вологості.

Якщо у формулі (1.24) замінити натуральний логарифм на десятковий, то отримаємо формулу (з іншими числовими коефіцієнтами):

$$T = \frac{0,07 \cdot V}{-S \cdot \lg(1 - \alpha_{cp}) + 1,74 \cdot \mu \cdot V}, \quad (1.25)$$

або

$$T = \frac{0,07 \cdot V}{A + B}, \quad (1.26)$$

де загальне звукопоглинання  $A$  дорівнює

$$A = -S \cdot \lg(1 - \alpha_{cp}), \quad (1.27)$$

поправка  $B$ , що враховує вологість повітря, дорівнює

$$B = 1,74 \cdot \mu \cdot V. \quad (1.28)$$

Поправка  $B$  на загасання звуку повітря пропорційна об'єму, оскільки звукова енергія послаблюється у всьому просторі приміщення.

Реверберація звуку із частотою понад 4 кГц.

Час реверберації розраховують так само за формулами (1.25) – (1.28). За даними І. Г. Дрейзена в студіях великого об'єму  $V > 2000 \text{ м}^3$  на частоті  $f = 4 \text{ кГц}$  величина  $B$  для звуку у вологому повітрі досягає  $1/3 - 1/4$  загального звукопоглинання  $A$ :

$$B = \frac{A}{4} \dots \frac{A}{3}, \quad (1.29)$$

Якщо частота ще більше, тобто  $f > 4 \text{ кГц}$ , то доданок  $B$  у знаменнику формули (1.26) починає переважати над доданком  $A$  ( $B > A$ ) та час реверберації прагне величини

$$T \rightarrow \frac{1}{24 \cdot \mu}. \quad (1.30)$$

Це означає, що час реверберації на верхніх частотах у приміщеннях великого обсягу визначається головним чином кліматичними умовами в приміщенні, тобто температурою та відносною вологістю.

Наведемо приклад. Є приміщення об'ємом  $V = 1000 \text{ м}^3$  і площею перешкод  $S = 700 \text{ м}^2$ .

Нехай на частоті  $f = 4$  кГц середній коефіцієнт поглинання дорівнює  $\alpha_{сер} = 0,15$ . Тоді без урахування поглинання у вологому повітрі час реверберації обчислимо за формулою Ейрінга (1.20):

$$T = \frac{1}{6} \cdot \frac{1000}{-700 \cdot \ln(1 - 0,15)} = 1,45 \text{ с.} \quad (1.31)$$

Якщо температура повітря дорівнює  $t = 21$  °С, а відносна вологість 70%, 40% і 20%, то значення коефіцієнта загасання  $\mu$  будуть відповідно рівні

$$\mu = 0,005; \quad 0,01; \quad 0,02 \quad (1.32)$$

і час реверберації дуже помітно зменшується до значень відповідно

$$T = 1,23 \text{ с}; \quad 1,05 \text{ с}; \quad 0,84 \text{ с.} \quad (1.33)$$

Тому підтримувати постійними кліматичні параметри в студії (або іншому приміщенні) необхідно не тільки для того, щоб виконавці почували себе добре, а й щоб забезпечити стабільні акустичні умови, в яких час реверберації не змінюється.

Внаслідок сезонної акліматизації людського організму комфортні умови дещо змінюються:

– влітку бажана температура

$$t = 22 \div 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

при відносній вологості

$$60 \dots 45 \text{ \% ,}$$

– взимку необхідно

$$t = 20 \div 23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

при відносній вологості

70...50 %.

### 1.7 Висновки по розділу 1

За часом реверберації та її глибині у природному звуковому середовищі можна оцінити розміри приміщення та його акустичні властивості. Звук голосу на сцені концертного залу, в порожній кімнаті, в кімнаті з безліччю м'яких речей помітно відрізняється за тембром, що сприймається.

У процесі природної реверберації змінюється частотний діапазон звуку. Високі частоти загасають швидше ніж низькі, тому тембр відбитого звуку в порівнянні з оригіналом має більш м'який, приглушений характер. Величина втрати високочастотних складових спектру залежить від відстані, пройденого акустичною хвилею, і від властивостей матеріалів поверхонь, що відбивають.

Часова структура ревербераційного процесу залежить від взаємного розташування джерела звуку, слухача і перешкод. Сам ревербераційний процес складається з прямого звуку, первинних відбиттів і суцільного ревербераційного хвоста. Отже, імітуючи даний процес у часі, можна побудувати штучний ревербератор.

Тривалість процесу реверберації залежить від об'єму приміщення, площі перешкод, коефіцієнта звукопоглинання поверхонь, а також від метеопараметрів повітря – температури і відносної вологості. Дані процеси найбільш точно описуються формулою Ейрінга з поправками Майєра.

На тембр звучання має вплив частотна залежність коефіцієнта звукопоглинання поверхонь перешкод. М'які перешкоди мають більше поглинання на верхніх звукових частотах, тверді перешкоди навпаки – краще відбивають верхні частоти, підкреслюючи їх, і роблячи звучання більш дзвінким. На другому місці йде вплив шляху поширення. На великих

дистанціях верхні частоти поглинаються сильніше, ніж нижні. Це потрібно враховувати при моделюванні процесу реверберації у великих приміщеннях.

Дана кваліфікаційна робота виконана 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 [26-29] присвячені дослідженню систем озвучення приміщень. Отже, дослідження в даній роботі відповідають традиційному напрямку наукових робіт колективу кафедри МІРЕС.

## 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ АЛГОРИТМІВ СТВОРЕННЯ ШТУЧНОЇ РЕВЕРБЕРАЦІЇ

### 2.1 Історія штучної реверберації

Найбільш природний та якісний спосіб передати в записі реверберацію – здійснити запис у гарному концертному залі. Очевидно, що цей спосіб доступний далеко не всім і не у всіх випадках, тому потреба в імітації реверберації народила ще до цифрової електронної доби кілька напівакустичних напівмеханічних прийомів її отримання.

Першою для імітації реверберації з'явилася ехо-камера (chamber). Це невелике приміщення, в якому знаходилася система звуковідтворення і мікрофон для запису звуку (рис.2.1).

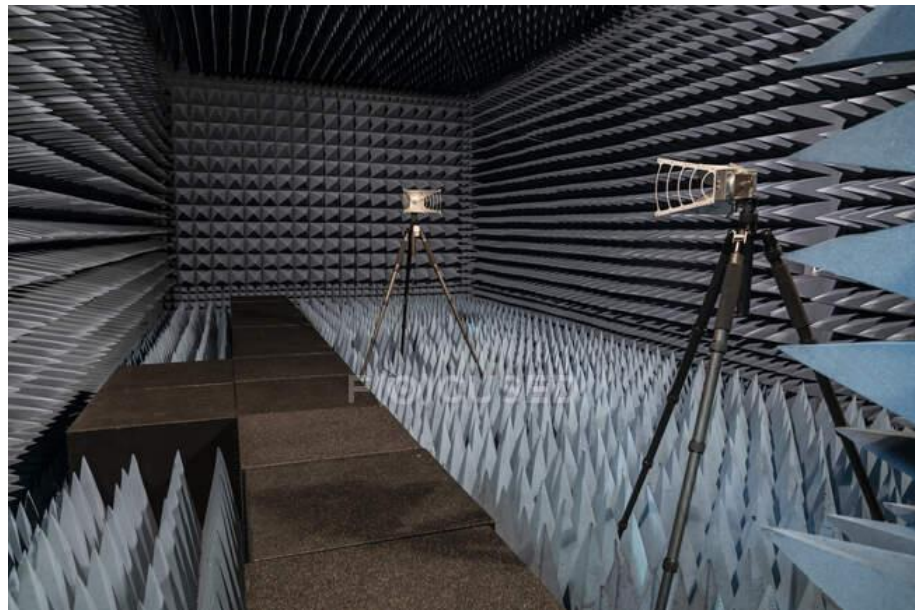


Рисунок 2.1 – Ехо-камера

Для посилення ефекту стіни приміщення були покриті рядами звуковідбивних тарілок або іншими подібними матеріалами. Змінюючи положення гучномовця та мікрофона можна було отримати невеликі варіації у записаному звуку.

Відносно популярний метод імітації реверберації було реалізовано великих підвішених з напругою металевих пластинах (plate) з прикріпленими до них електромагнітними перетворювачами (рис.2.2).

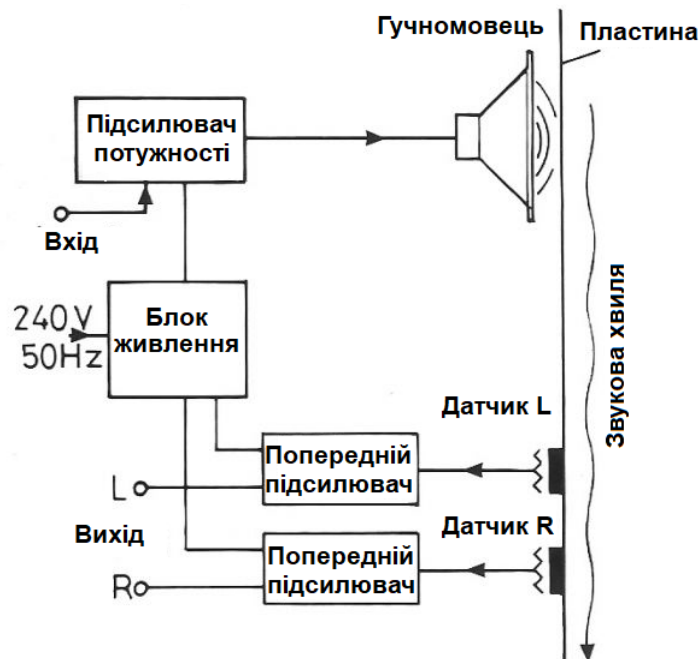


Рисунок 2.2 – Ревербератор plate на металевій пластині

За допомогою демпфування пластини можна було керувати часом її коливань. Вібрати пластини імітували справжню реверберацію досить умовно, проте симуляція такого способу знайшла втілення у всіх сучасних цифрових ревербераторах.

Більш низькоякісною варіацією цього способу була пружинна (spring) реверберація, яка раніше використовувалася в гітарних підсилювачах (рис.2.3).

На одному кінці пружини стояв електромагнітний перетворювач, що приводив пружину в коливання, а на іншому звукознімач, який сприймав усі її корисні та паразитні коливання. Першим надходить прямий сигнал від джерела звуку, що має найбільшу інтенсивність. Слідом за ним приходять ранні або первинні відбиття від стін, підлоги, стелі, що мають меншу інтенсивність, величина якої залежить і від пройденої відстані та від поглинаючих властивостей матеріалів поверхонь.

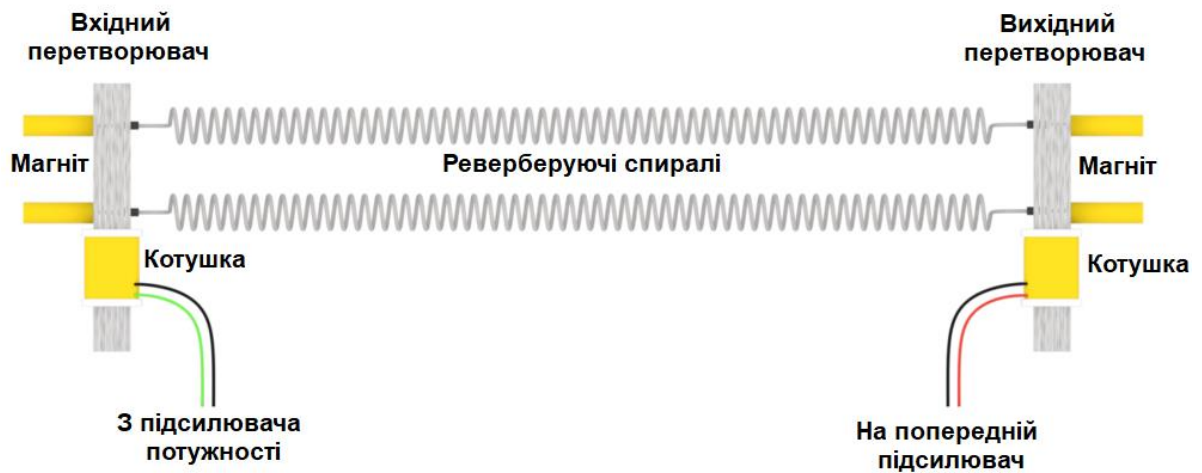


Рисунок 2.3 – Ревербератор spring на пружині

Далі підходять вторинні і численні наступні відображення з інтенсивністю, що швидко зменшується. У реальній ситуації звукові імпульси зазвичай мають довжину більшу, ніж час приходу перших відбитків, тому реверберація накладається на вихідний звук у його звучанні.

Часто до ранніх відбитків зараховують вторинні відлуння, що відходять від вихідного прямого сигналу не більше ніж на 60 мс.

Ефект реверберації проявляється у більш соковитому гучному об'ємному звучанні, зазвичай приємнішому для сприйняття, ніж вихідний «сухий» звук.

В аудіозаписі реверберація надає почуття глибини простору. Джерело звуків з більш вираженим ефектом реверберації суб'єктивно відчувається розташованим на відстані від слухача.

Реверберація сприймається разом, якщо проміжки між відбитими сигналами менше 100 мс. При збільшенні інтервалу між звуками, що приходять, понад 100 мс суб'єктивне сприйняття людини відзначає вже роздільне відлуння.

Чим більші розміри приміщення і менше поглинаюча здатність поверхонь, тим більша тривалість реверберації. Під часом реверберації розуміють тривалість загасання сигналу 60 дБ від початкового значення.

За часом реверберації та її глибини у природному звуковому середовищі можна оцінити розміри приміщення та його акустичні властивості. Звук голосу на сцені концертного залу, в порожній кімнаті, в кімнаті з безліччю м'яких речей помітно відрізняється за тембром, що сприймається.

У процесі природної реверберації змінюється частотний діапазон звуку. Високі частоти загасають швидше ніж низькі, тому тембр відбитого звуку в порівнянні з оригіналом має більш м'який, приглушений характер. Величина втрати високочастотних складових спектру залежить від відстані, пройденого акустичною хвилею, і від властивостей матеріалів поверхонь, що відбивають.

## 2.2 Цифрові ревербератори

Припустимо, що є проста задача імітації реверберації звуку всього від двох стін (рис.2.4, а).

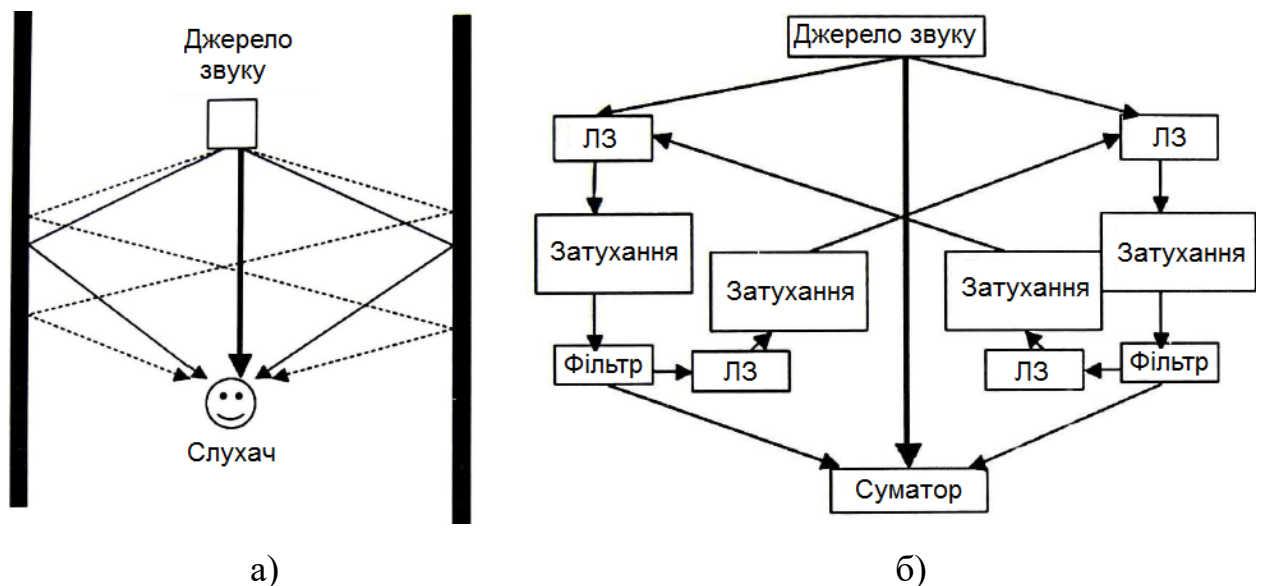


Рисунок 2.4 – Моделювання процесу реверберації при відбитті від двох стін:

а – постановка задачі, б – структурна схема обробки

В подібному методі реверберація імітується у вигляді ліній затримки (ЛЗ), величини яких залежать від розмірів приміщення (Room Size). Також

має значення коефіцієнт відбиття поверхонь (затухання) та АЧХ фільтрів, що враховують залежність коефіцієнтів звукопоглинання перешкод від частоти звуку. Вторинні відбиття звуку враховані шляхом включення ліній зворотного зв'язку.

За умови врахуванні первинних та вторинних відбиттів від усіх 6 поверхонь приміщення (4 стіни, стеля і підлога) схема алгоритму реверберації помітно ускладнюється (рис.2.5).

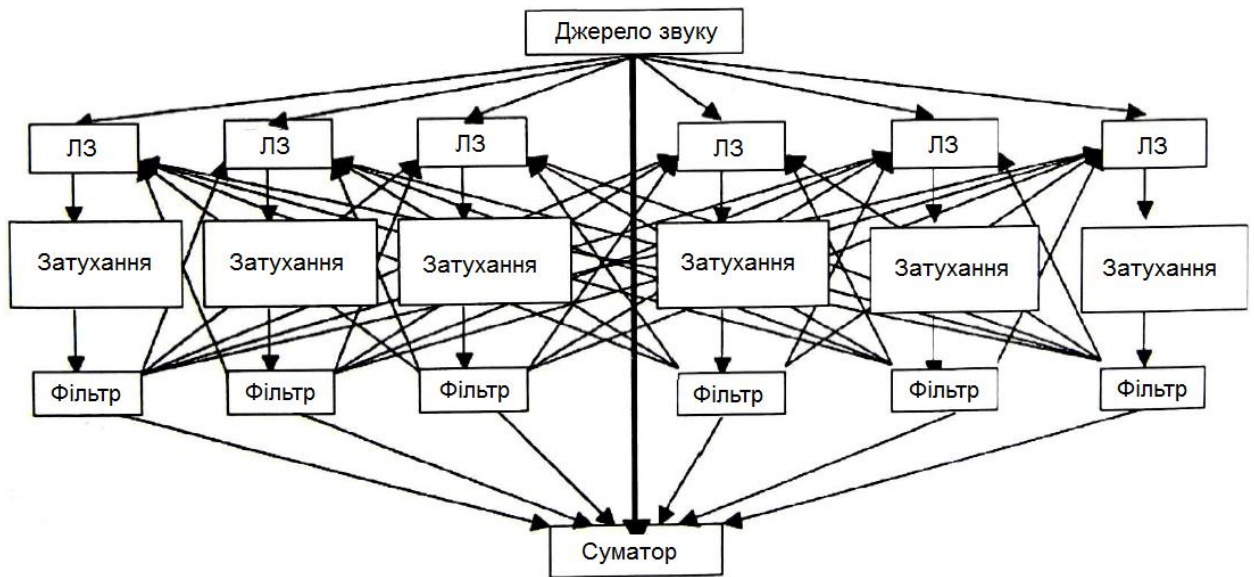


Рисунок 2.5 – Структурна схема цифрового ревербератора при врахуванні відбиттів від 6 поверхонь, обмежуючих приміщення

Насправді ситуація ще складніше, і треба врахувати, що відстань між стінами залежить від кута падіння звукової хвилі. Дані алгоритми не враховують, що звук відбивається не тільки від стін, але також і від інших перешкод у приміщенні, що породжують потоки додаткових відбитих звукових хвиль. Крім того, кожна поверхня має свою властивість звукопоглинання, внаслідок чого відбитий від даної поверхні сигнал може мати різний спектр.

За даної причини для імітації реалістичної реверберації використовують більш складні алгоритми.

Основою для імітації пізніх відбиттів у цифровому ревербераторі є гребінчастий і всепропускний фільтри. У першому випадку використовується

тільки зворотний зв'язок, а в другому – і прямий, і зворотний зв'язок. Структурні схеми цих фільтрів показані на рис.2.6.

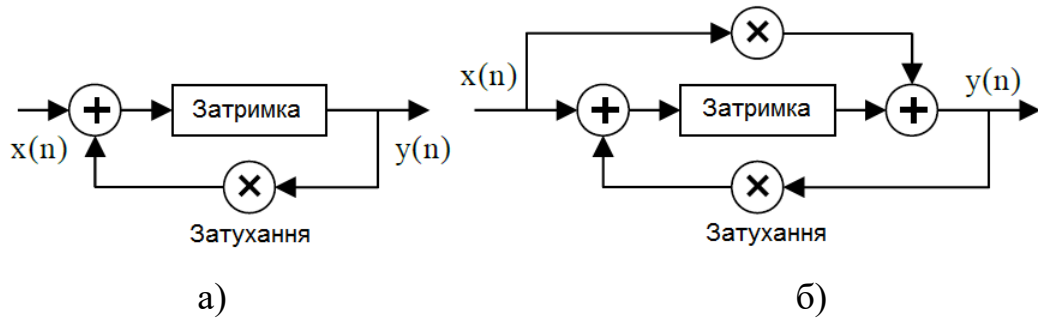


Рисунок 2.6 – Формування пізніх відбиттів гребінчастим (а) і всепропускним (б) фільтрами

Передавальна функція гребінчастого фільтра описується виразом:

$$H(z) = \frac{z^{-M}}{1 - g \cdot z^{-M}}, \quad (2.1)$$

передавальна функція всепропускного фільтра – виразом

$$H(z) = \frac{z^{-M} - g}{1 - g \cdot z^{-M}}, \quad (2.2)$$

де  $M$  – тривалість лінії затримки,

$g$  – коефіцієнт передавання.

Імпульсні відгуки даних фільтрів показані на рис.2.7.

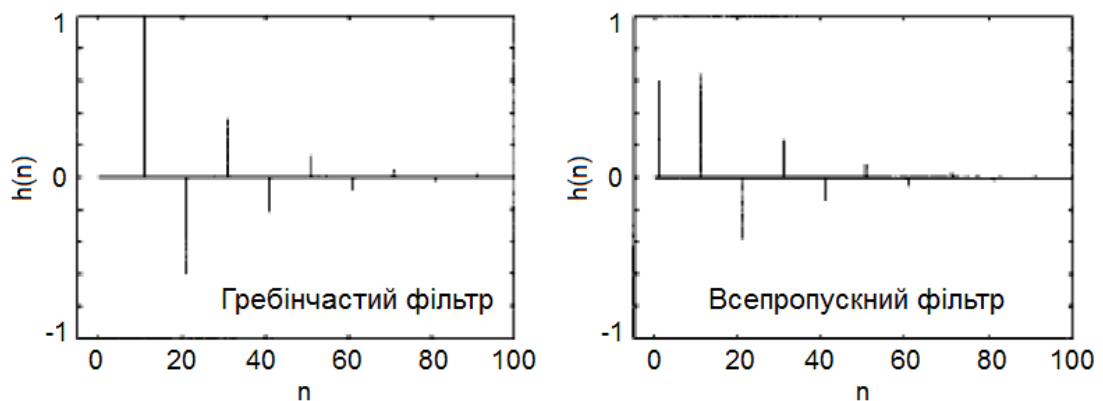


Рисунок 2.7 – Імпульсні відгуки гребінчастого та всепропускного фільтрів

Частотні характеристики даних фільтрів показані на рис.2.8.

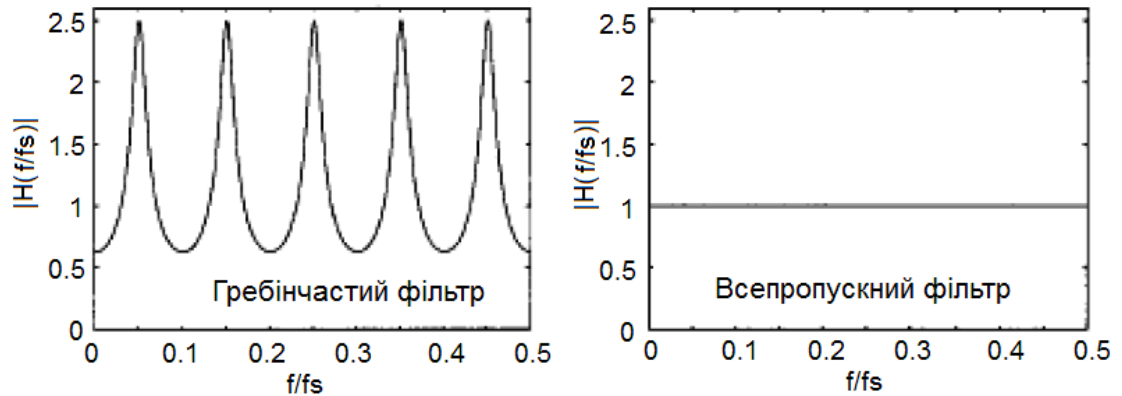


Рисунок 2.8 – Частотні характеристики гребінчастого та всепропускного фільтрів

Ранні відбиття мають головне значення для просторового сприйняття звуку слухачем, зокрема, ефекту об'єму приміщення. Найчастіше для імітації ранніх відбиттів застосовують алгоритм Герзона (рис.2.9).

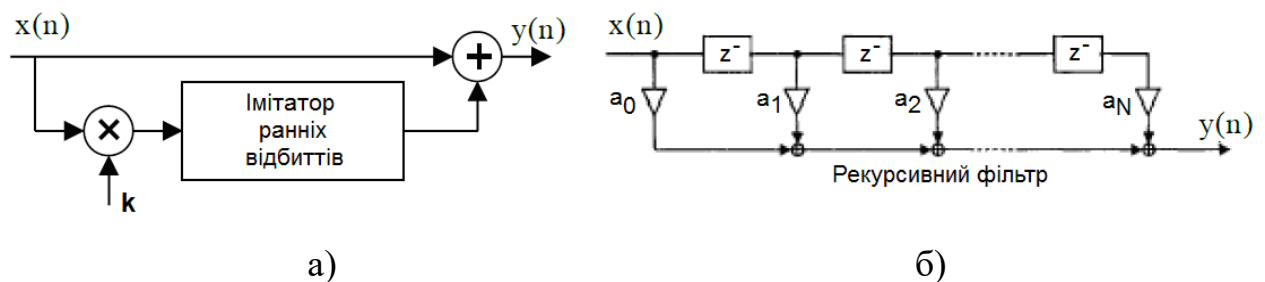


Рисунок 2.9 – Імітатор ранніх відбиттів Герзона: а – загальна структурна схема ревербератора, б – імітатор ранніх відбиттів

У схемі на рис.2.9, а звуковий сигнал помножується на коефіцієнт зваження  $k$  і подається на блок, який імітує ранні звуковідбиття, далі вони додаються до прямого звукового сигналу. В якості імітатора відбиттів зазвичай застосовується рекурсивний фільтр із затримкою у  $M$  вибірок (рис. 2.9, б). Сигнали на відводах лінії затримки зважуються власними коефіцієнтами затухання  $g_i$ .

Отже, виходячи з вищесказаного, загальна схема сучасного цифрового ревербератора може бути представлена у наступному вигляді (рис.2.10).

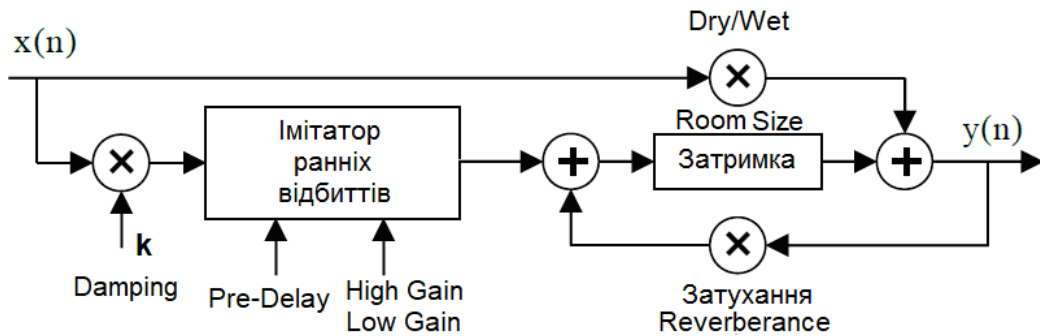


Рисунок 2.10 – Загальна схема сучасного цифрового ревербератора

На рис.2.11 для порівняння наведено вікно налаштування ревербератора в програмі Audacity.

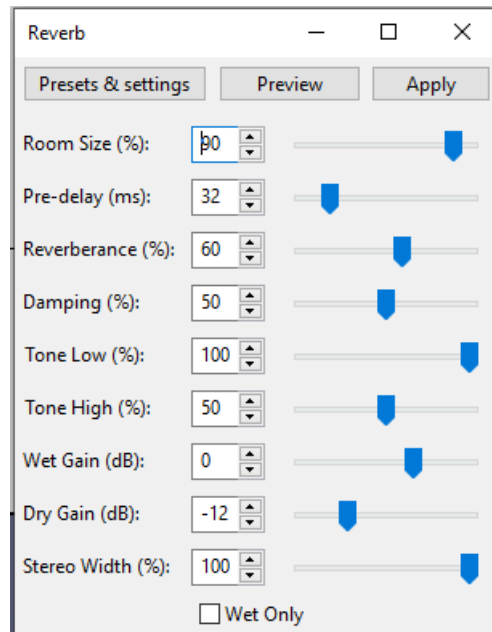


Рисунок 2.11 – Вікно налаштування ревербератора в програмі Audacity

Порівнюючи рис. 2.10 і рис.2.11 можна знайти відповідні регулювання і зрозуміти, як вони впливають на звуковий сигнал і на загальний характер звучання. Виходячи з аналізу сучасних джерел інформації про штучну реверберацію, можна упевнено стверджувати, що в даній кваліфікаційній роботі зроблено перше чітке і ясне пояснення відповідності налаштувань програмного ревербератора і його структурної схеми. Навіть виробники програмних продуктів не наводять структурної схеми алгоритмів, обмежуючись лише словесним описом.

### 2.3 Вплив реверберації на просторові характеристики об'єктів звукової сцени

Великий інтерес має підхід до визначення просторових характеристик, що відповідає принципу "прив'язки до звукової сцени" (scene – basic principle) [32]. Цей принцип передбачає, що об'єкти звукової сцени, що відтворюються, групуються згідно з їхніми функціями на кількох відповідних рівнях.

Пояснити цей принцип можна за допомогою прикладу, показаного на рис. 2.12 [32]. Тут декілька окремих джерел (це можуть бути, наприклад, різні музичні інструменти) розташовані в обмеженому просторі. Як правило, при записі звуку відбувається їхнє панорамування, або, іншими словами, вони розташовуються в певних точках сцени, створюючи стереофонічний образ. Джерела, які формують такий образ, можуть бути згруповані слухачем у єдиний об'єкт сцени, який можна класифікувати як "ансамбль". Макро-об'єкт сцени, названий "ансамблем", може бути сприйнятий як має власні просторові характеристики, такі як просторове розташування, ширина, глибина та відстань до слухача [32].

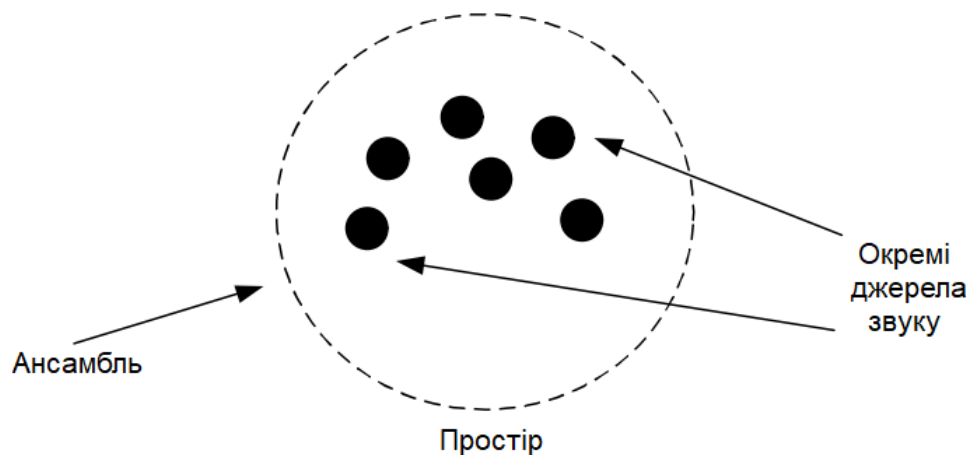


Рисунок 2.12 – Об'єкти звукової сцени

Крім того, окремі джерела у складі ансамблю можуть сприйматися як ті, що мають власні розташування, ширину, і, можливо, глибину.

Таким чином, доцільно розділити просторові характеристики звукової сцени на мікро- та макрохарактеристики:

- мікрохарактеристики використовуються для опису властивостей окремих джерел звуку у складі сцени,
- а макрохарактеристики – для опису сцени загалом чи групи джерел у ній [32].

Сприйняття звукової сцени загалом складається з сприйняття навколишнього звукового простору (як правило, сформованого сукупністю ранніх відбиттів та ревербераційного фону), в якому розташовуються групи джерел, що містять, у свою чергу, окремі джерела.

При оцінюванні якості звучання зручно розділити суб'єктивні просторові характеристики звукової сцени на такі, які пов'язані з сприйняттям розмірів джерел звуку, а також навколишнього звукового простору (ширина, глибина), і характеристики, пов'язані з відчуттям оточення слухача звуком, що відтворюється.

Так, група характеристик, що описують сприйняття розмірів об'єктів сцени, може бути класифікована відповідно до табл. 2.1 та рис. 2.13.

Таблиця 2.1 – Класифікація просторових показників, що описують сприйняття розмірів об'єктів звукової сцени

Характеристика	Визначення
<b>Мікрорівень</b>	
Ширина окремого джерела	Сприйнята поперечна довжина окремого джерела звуку у складі сцени.
Відстань до окремого джерела	Дистанція між слухачем та сприйманим місцезнаходженням джерела звуку.
Глибина окремого джерела	Розмір “фронт-тил”, що сприймається, окремого джерела звуку у складі сцени.
<b>Макрорівень</b>	
Ширина ансамблю	Загальна ширина певної групи джерел звуку (або всіх джерел у складі сцени).
Відстань до ансамблю	Дистанція між слухачем та сприйманою середньою точкою ансамблю.
Глибина ансамблю	Поздовжній розмір, що сприймається, “фронт-тил” групи джерел звуку.
Ширина простору	Ширина звукового простору, що сприймається, в якому розташовані окремі джерела.
Глибина простору	Сприймається глибина звукового простору, в якому розміщені джерела
Ширина сцени	Сприйнята загальна або повна ширина всієї звукової сцени
Глибина сцени	Відчуття перспективи у звуковій звуковій сцені

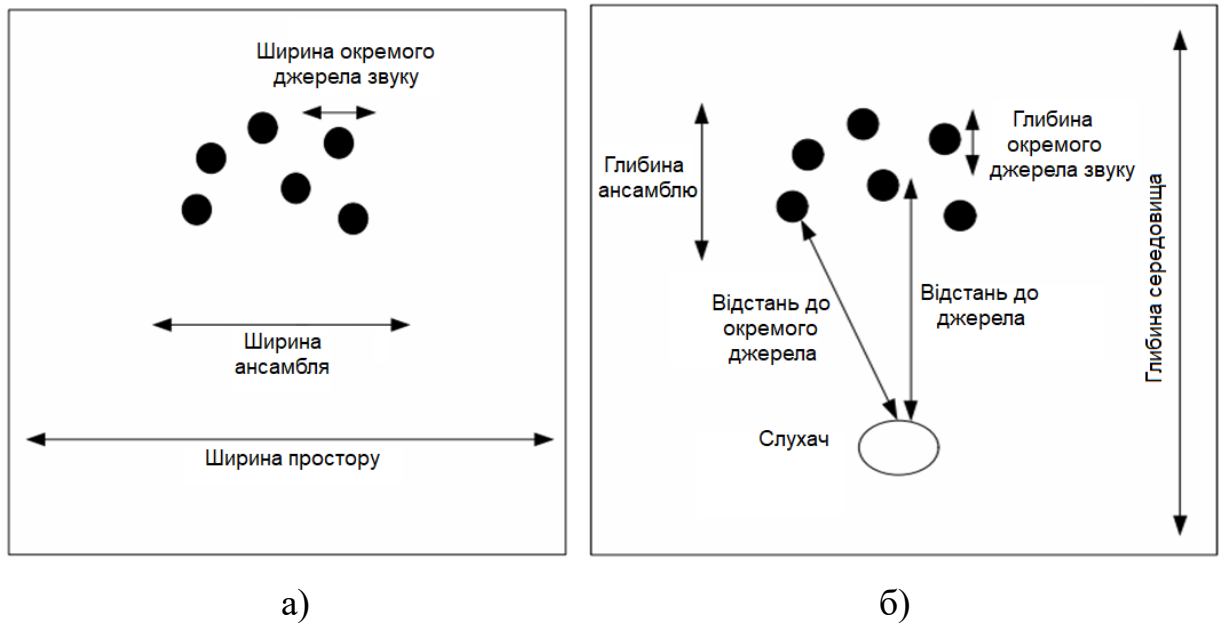


Рисунок 2.13 – Характеристики, що описують сприйняття розмірів об'єктів звукової сцени: а – характеристики ширини; б – характеристики глибини та відстані

Говорячи про суб'єктивну оцінку звучання з використанням зазначених у табл. 2.1 характеристик, важливо відзначити, що не всі вони сприймаються слухачем однаково виразно, тобто, оцінити деякі з них для слухача складніше, ніж інші. Так, наприклад, здається ширина об'єктів сцени сприймається більш відчутно, ніж глибина. Це веде до так званого ефекту «маскування сприйняття», що складається у тому, що у сильніших характеристик є тенденція домінувати в загальному судженні про якість звучання; при цьому внесок слабше відчутних характеристик практично відсутнє.

На окрему увагу заслуговує ситуація, коли слухачі не можуть оцінити ширину джерела або групи джерел у звуковій сцені, що відтворюється, у зв'язку з тим, що вони сприймаються слухачами настільки широкими чи розпливчастими, що описуються ними як «охоплюючі», «навколишні» чи «обгортаючі» [32]. Іншими словами, у деяких ситуаціях характеристика, яка називається шириною окремого джерела (табл. 2.1), перетворюється на іншу, звану обгортанням (LEV – listener envelopment) або оточенням [32].

Опис характеристик, пов'язаних із відчуттям оточення слухача звуком, наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Визначення характеристик оточення слухача відтворюваним звуком

Характеристика	Визначення
Оточення слухача звучанням окремого джерела	Відчуття охоплення звучанням одного джерела
Оточення слухача звучанням ансамблю джерел	Відчуття охоплення звучанням групи джерел
Оточення слухача просторовим звучанням	Відчуття охоплення реверберуючим або фоновим звуком
Ефект присутності	Відчуття присутності у (обмеженому) просторі

Як показали дослідження [32], ефект присутності та оточення звучанням, що відносяться до деякого замкнутого простору, не обов'язково є одним і тим же, незважаючи на значну схожість. Перша характеристика є передумовою для появи другої: якщо слухач відчуває себе таким, що знаходиться всередині простору, то він зможе дати оцінку його ширині та глибині і більшою чи меншою мірою відчувати обгортання реверберуючим звуком.

Завдання встановлення взаємозв'язку об'єктивних параметрів, що характеризують акустичні властивості різних приміщень, і суб'єктивних, використовуваних з метою оцінки якості звучання музики й мови у цих приміщеннях, нині вважаються остаточно вирішеними [32].

Як відомо з досліджень акустики концертних залів, враження, що виникає у слухача визначається характером ревербераційного процесу в приміщенні. До основних об'єктивних параметрів ревербераційного процесу належать [32]:

- час стандартної реверберації  $T$ ;
- енергія раннього звуку, що є сукупністю прямого звуку і відбитих звукових хвиль, що надійшли протягом перших 80 мс після надходження прямого звуку;

- енергія реверберуючого звуку, яка визначається як загальна звукова енергія відбитих звукових хвиль, які досягають слухача після 80 мс;
- акустичне відношення – відношення щільності енергії відбитих звукових хвиль до густини енергії прямого звуку.

Розглядаючи просторові характеристики об'єктів звукової сцени, не можна виключати вплив такої характеристики як коефіцієнт внутрішньослухової крос-кореляції, який визначається як коефіцієнт кореляції сигналів, що надходять до двох вух.

Коефіцієнт характеризує ступінь відмінності вказаних звукових сигналів як за часом їх надходження, і по амплітуді. Цей параметр також розглядають у контексті впливу ревербераційного процесу на просторові характеристики звучання, він визначає місцезнаходження та довжину слухових об'єктів [32].

Результати численних суб'єктивних експертиз [32] показали, що існує зв'язок між деякими просторовими характеристиками об'єктів звукової сцени та характеристиками ревербераційного процесу. З аналізу отриманих результатів можна будувати висновки про ступеня впливу реверберації деякі суб'єктивні просторові характеристики звучання у закритих приміщеннях.

Результати аналізу взаємозв'язку параметрів ревербераційного процесу просторових характеристик звучання, використовуваних при суб'єктивному оцінюванні звучання, можна представити як табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Взаємозв'язок просторових характеристик об'єктів звукової сцени та характеристик ревербераційного процесу

Характеристика	Визначення
1	2
Мікрорівень	
Ширина окремого джерела та його локалізація	Рівень та різницю часу надходження прямого та перших відбитих від бічних стін приміщення звуків. Коефіцієнт внутрішньослухової крос кореляції.

Продовження табл.2.3.

Макрорівень	
1	2
Ширина звукового простору	Час реверберації T. Структура перших відображень та час їх запізнення щодо прямого звуку та один до одного. Коефіцієнт внутрішньослухової крос кореляції.
Глибина простору	Час реверберації T. Структура перших відображень та час їх запізнення щодо прямого звуку та один до одного.. Величина акустичного відношення.
Оточення слухача просторовим звуком	Час реверберації Tr. Енергія пізнього реверберуючого звуку, що приходить із різних напрямків.

В цілому можна відзначити, що характеристики, що використовуються для суб'єктивної оцінки якості передачі звукового простору, схильні до впливу ревербераційного процесу різною мірою. У табл. 2.3 вказані просторові характеристики, які в найбільшій мірі залежать від характеру ревербераційного процесу.

#### 2.4 Висновок по розділу 2

Визначення суб'єктивних характеристик звучання заслуговує на значну увагу, оскільки в процесі експертиз слухачі повинні дати однозначні оцінки звуковому матеріалу на основі своїх вражень. Тому завдання організаторів суб'єктивно-статистичних експертиз щодо оцінювання якості звукового матеріалу мовних програм – запропонувати вичерпний список характеристик, які складають загальне судження про якість звуку.

Окремим завданням є встановлення взаємозв'язку між об'єктивними параметрами, які характеризують звуковий сигнал або акустичні властивості приміщення, якому цей сигнал відтворюється, та суб'єктивною оцінкою звучання, що дозволить забезпечити звукоінженерам свого роду “зворотний зв'язок”, що дозволяє регулювати якість звучання при зміні характеристик

сигналів або методів їх запису та обробки. Інтерес перш за все представляє дослідження ступеня впливу на просторові характеристики звукової сцени та її об'єктів показників ревербераційного процесу у приміщеннях, призначених для виконання та прослуховування звукового матеріалу.

У рамках магістерської роботи проведено аналіз впливу показників ревербераційного процесу на ряд характеристик, які використовуються для опису відтворення звукового простору. Аналізувалися як просторові макрохарактеристики звукової сцени (використовувані для опису сцени загалом чи групи об'єктів у ній), і мікрохарактеристики (використовуються для опису окремих джерел звуку у складі сцени).

Для кожної з характеристик визначалося, які з основних показників ревербераційного процесу найбільше впливають на оцінку даної характеристики слухачем. Відмінним є той факт, що традиційна акустична характеристика закритих приміщень – час стандартної реверберації  $T$  на різних частотах не є у даному контексті вичерпною, оскільки впливає переважно на макрорівні (табл. 2.3).

## 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ РЕВЕРБЕРАЦІЇ ЗВУКУ

### 3.1 Критерії поділу моделей реверберації

Глобально всі моделі реверберації можна розділити за двома критеріями:

- тип алгоритму реверберації – згорткова або алгоритмічна,
- та безпосередня модель реверберації, що визначає чи моделює ревербератор деяке реальне фізичне приміщення, тобто чи він має блок, що моделює ранні відбиття.

Згортка – математичне поняття, що не згадується в музичній літературі, проте добре відоме, зокрема, звукорежисерам, які досить часто використовують подібні алгоритми у своїй повсякденній діяльності.

Суть згортки полягає в «змішуванні» двох сигналів для отримання одного результуючого, що містить у собі як часову, так і частотну інформацію обох вихідних сигналів. Типовими згортковими ревербераторами на сьогоднішній день є, наприклад, Altiverb від Audio Ease або IR1 від Waves.

У сфері звукорежисури для «переміщення» одного сигналу в інше середовище в якості вихідного середовища виступає імпульсна характеристика приміщення, що є відгуком замкнутої системи (у разі реверберації – фізичного приміщення) на одиничний імпульс, тобто, на математичну функцію, що має нескінченно малу тривалість, нескінченно велику амплітуду та одиничну площу.

Оскільки така функція є математичною абстракцією, у реальних умовах створення та відтворення такої функції обмежено рядом спрощень (використання генерування одиничного імпульсу в цифровому середовищі з подальшим програвання через акустичну систему, використання коротких електричних розрядів і т.д.).

У контексті фіксації імпульсної характеристики приміщення для використання у стереофонічній обробці звукових сигналів прийнято використовувати стереопару вимірювальних мікрофонів (рис.3.1).

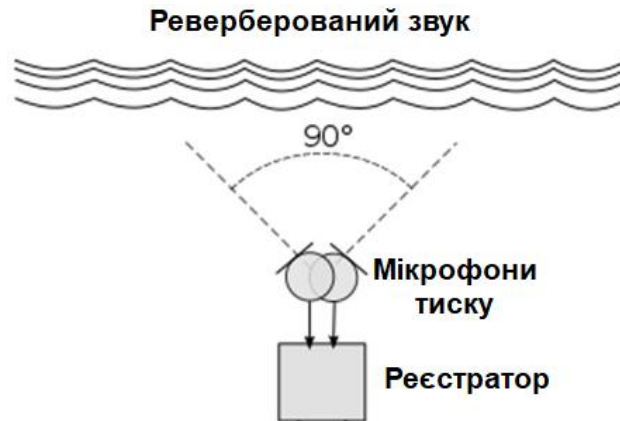


Рисунок 3.1 – Запис імпульсної характеристики приміщення стереопарою вимірювальних мікрофонів

Втім, зустрічаються і більш художні методи фіксації імпульсних характеристик із застосуванням як широкомембранних, так і вузькомембранних конденсаторних мікрофонів, електретних мікрофонів і т.д.

Математично згортка найпростіше реалізована як перемноження частотних спектрів двох функцій, тобто

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) f_2(t - \tau) d\tau. \quad (3.1)$$

Замість ресурсомісткого у обчислювальному плані інтегрального виразу (3.1) прийнято використовувати ШПФ (швидке перетворення Фур'є) (3.2) обох функцій з наступним перемноженням їх результуючих спектрів, що дозволяє значним чином (до двох порядків) скоротити необхідне обчислювальне навантаження:

$$y(n) = IFFT\{FFT[h(n)]\} \cdot FFT\{x(n)\}. \quad (3.2)$$

де  $x(n)$  – вхідний сигнал у часовій області;

$y(n)$  – вихідний сигнал у часовій області.

Отже процес запису сигналів імпульсної характеристики приміщення має включати такі етапи (рис.3.1): формування імпульсу сигналу збудження (вплив), а також наступний запис імпульсних характеристик за допомогою стереопари мікрофонів (рис.3.2).

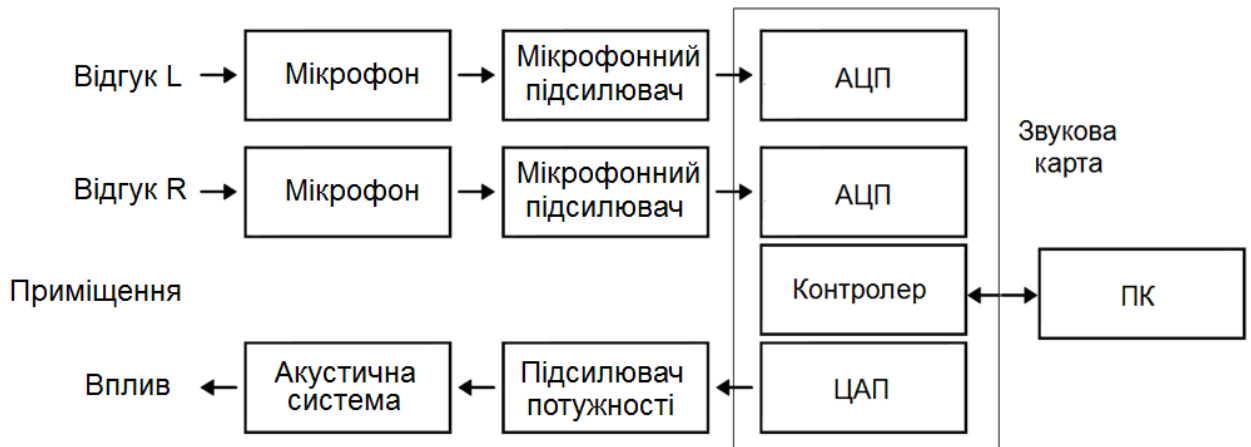


Рисунок 3.2 – Структурна схема запису імпульсної характеристики приміщення

Схема має персональний комп'ютер ПК, дискретну звукову карту, сигнал збудження посилюється і випромінюється акустичною системою, а реверберовані відгуки приймаються стереопарою мікрофонів.

Якщо рівень прямого звуку треба мінімізувати, того можна досягнути шляхом застосування мікрофонів – приймачів тиску з кардіоїдною діаграмою спрямованості і направити їх мінімум на акустичну систему. Також можна поряд з акустичною системою мати поглинаючий звуковий екран, зменшивши потрапляння прямого звуку до мікрофонів.

### 3.2 Дослідження алгоритмічних методів штучної реверберації

Алгоритмічні ревербератори повною мірою слідують культурі звуку у сферах, що стосуються класичних типів реверберації та їх функціонального поділу.

Усього існує чотири класичні типу реверберації:

- рум-реверберація (кімнатна реверберація);
- хол-реверберація (моделювання концертної зали);
- плейт-реверберація (листова реверберація);
- спрінг-реверберація (пружинна реверберація).

Окремим пунктом розташовується реверберація як спецефект.

Рум- та хол-реверберація представляють собою віддаляючий тип реверберації, тобто їхнє завдання – на деяку відстань суб'єктивно віддалити джерело звукового сигналу у тривимірному акустичному просторі. При цьому зовсім не обов'язково віддаляти інструменти, що знаходяться в ближньому звуковому полі реверберації. Саме для них прийнято використання в художніх цілях спрінг- та плейт-ревербераторів, які є невіддаляючими.

Психоакустичний принцип віддалення базується на особливості людського слуху бінаурально сприймати габарити приміщення виходячи з оцінки насамперед ранніх відбиттів, але й ревербераційного хвоста.

Якщо слухач відчуває у ревербераційному сигналі явний акцент на ранніх відбиттях і слабовиражений ревербераційний хвіст при невеликій передзатримці (predelay) реверберації – він автоматично інтуїтивно визначає для себе цю реверберацію як кімнатну, тобто камерну. Джерело звуку, поміщене в подібну реверберацію, не може сприйматися слухачем як далеке, оскільки розміри приміщення, емпірично відтворювані слухачем цього просто не дозволяють.

Якщо ж у ревербераційному сигналі слабо виражені ранні відбиття при широкій їх стереокартині та великому значенні передзатримки, однак при цьому яскраво виражений довгий ревербераційний хвіст, який однозначно сприймається як частина фактури звуку – сигнал, поміщений у такі ревербераційні умови сприймається слухачем як суттєво віддалений, що знаходиться в далекому, дифузному звуковому полі.

Саме на перелічених вище критеріях будується основна відмінність рум- і хол-реверберації. На рис.3.3 показані імпульсні характеристики двох моделей реверберації, отримані з алгоритмічного ревербератора програми Audacity: Concrete Room (бетонна кімната) та Church (собор).

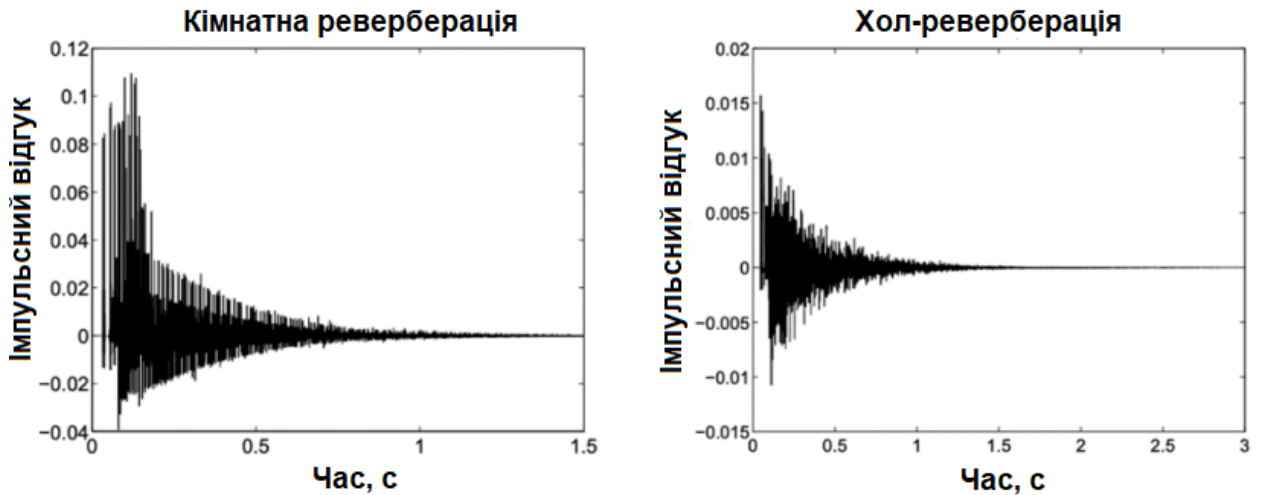


Рисунок 3.3 – Імпульсні характеристики алгоритмічного ревербератора програми Audacity: а – Concrete Room (бетонна кімната), б – Church (собор)

З рис.3.3 очевидна різниця у співвідношенні ранніх та пізніх відбиттів ревербераційних сигналів, а також у тривалості ревербераційних хвостів.

Кімнатна та хол-реверберація цілком можуть використовуватися в процесі зведення однієї і тієї ж фонограми на різних джерелах звукових сигналів з метою поміщення їх у різні акустичні умови, і, отже, ефективного поділу їх по осі глибини тривимірного акустичного простору. Очевидно, що у такому разі інструменти, вміщені у кімнатну реверберацію будуть дещо віддалені від інструментів ближнього звукового поля, проте при цьому їхнє розташування відносно слухача буде значно ближче, ніж у інструментів, поміщених у хол-реверберацію.

Прототипом сучасних цифрових плейт-ревербераторів є аналогові звукові рішення. Конструкція плейт-ревербераторів розглянута в розділі 2. Листовий ревербератор використовує невеликий гучномовець (привід), прикріплений до сталевій габаритній пластині з метою викликати її вібрацію та кілька звукознімачів для фіксації звуку при його поширенні в площині пластини.

З конструкції плейт-ревербератора цілком очевидно, що цей тип реверберації позбавлений моделі ранніх відбиттів, отже, дана реверберація неспроможна сприйматися людським слухом як природна, тому що є невіддаляючою. Також, певної «штучності» плейт-реверберації додає специфічний «металевий» звук, а також досить вузька, нетипова для приміщень стереокартина ревербераційного сигналу.

На рис.3.4 для порівняння показані спектрограми імпульсних характеристик хол- та плейтревербераторів з рівною тривалістю 3 с.

Використано попередньо встановлені пресети алгоритмічного ревербератора програми Audacity: Church (собор) та Plate (листовий ревербератор).

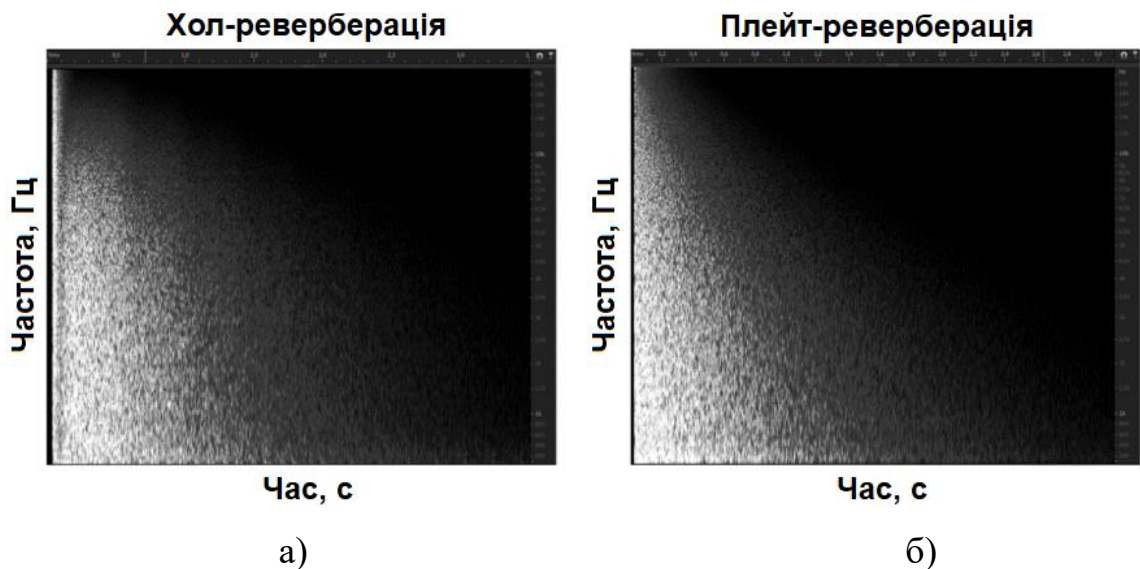


Рисунок 3.4 – Спектрограми імпульсних характеристик хол- (а) та плейтревербераторів (б) з рівною тривалістю 3 с

Отже, перелічені властивості роблять плейт-реверберацію оптимальним вибором для інструментів ближнього звукового поля. Також окремо варто відзначити досить вузьку стереокартину плейтреверберації, завдяки чому цей тип реверберації особливо застосовний на монофонічних джерелах звукового сигналу, що розташовуються, як було зазначено вище, в ближньому звуковому полі, зокрема:

– вокал,

– сольні монофонічні інструменти – гітара, скрипка і т.д.

Варто також відзначити той факт, що цифрові плейт-ревербератори часто мають більшу жорсткість («зернистість») звучання, а отже, більш щільний частотний спектр, а також можливість більш гнучкого налаштування параметрів реверберації, наприклад, введення часу передзатримки. У зв'язку з цим логічно припустити, що «цифрові» алгоритми плейт-реверберації, що зустрічаються, наприклад, у таких класичних програмних ревербераторах більш застосовні в щільних, насичених фонограмах, у той час як алгоритми «аналогових» плейт-ревербераторів більш актуальні під час зведення делікатних, фактурно прозорих музичних творів.

Спринг-реверберація теж розглянута в розділі 2. За принципом своєї роботи нагадує плейт-реверберацію, однак, ґрунтується вона на одній або кількох гвинтових пружинах, встановлених під невеликим натягом, прикріплених до магнітного валика та наведених у дію електромагнітної муфтою. Вхідний звуковий сигнал перетворюється на коливання пружини, які зчитуються звукознімач, розташованим на протилежному кінці приладу. Специфічний звук пружинної реверберації обумовлений різними типами вібрацій, що виникають, поперечних і поздовжніх, які й обумовлюють характерний «пружний» звук ревербератора. На рис.3.5 показана спектрограма імпульсної характеристики пружинного ревербератора.

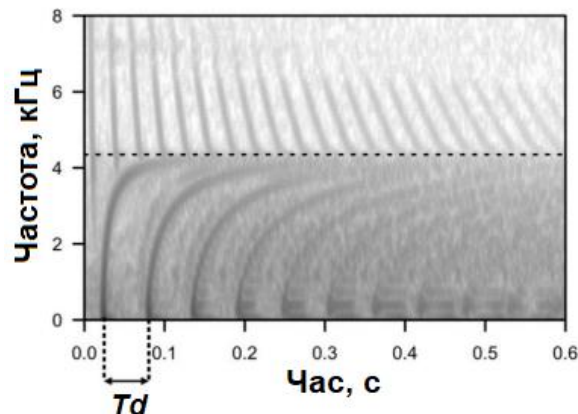


Рисунок 3.5 – Спектрограма імпульсної характеристики пружинного ревербератора

Пунктирна характеристика на рис.3.5 поділяє область корисного спектра ревербераційного сигналу та область гармонік вищих порядків, що істотно не впливає на характер реверберації, що очевидно зі спектральної щільності цієї області.

Незважаючи на те, що пружинна реверберація має яскраво виражений характер і історично насамперед добре знайома гітаристам, оскільки пружинні ревербератори через свою компактність часто вбудовувалися у класичні гітарні підсилювачі, сфера її застосування дуже подібна до плейт-реверберації, на що вказують її акустичні властивості:

- досить «темний» тембр,
- вузька стереокартина,
- невіддаляючий характер і т.д.

У зв'язку з цим в сучасній, особливо естрадній музиці спрінг-реверберацію цілком можна розглядати як повноцінну альтернативу плейт-реверберації. Особливо враховуючи той факт, що характерний ефект вібрації пружин нівелюється зі збільшенням фізичної кількості пружин у приладі, що доступно як налаштування у великій кількості сучасних цифрових рішень.

Окремо варто розглянути реверберацію як спецефект. Цей тип реверберації варто також віднести до невіддаляючих, проте, від плейт-і спрінг-реверберації його відрізняють насамперед неприродні акустичні властивості. Типовим прикладом реверберації, що використовується як спецефект, є ефект «шиммер».

Реверберація як спецефект, по-перше, є строго цифровою, а по-друге, має дві обов'язкові та одну додаткову звукову властивості. Як відомо, максимальний час природної реверберації не перевищує 4 с, і в частотній області має характерне послаблення ВЧ-складової з плином часу. Реверберація, що використовується як спецефект, порушує обидва ці правила: вона має неприродно великий час реверберації і неприродним частотним спектром, в якому найчастіше ВЧ-складова загасає одночасно з НЧ-складовою.

Додатковою властивістю реверберації спецефекту може бути глибока модуляція звукового сигналу. На рис.3.6 показана спектрограма імпульсної характеристики для стартового налаштування ревербератора Shimmer програми Audacity.

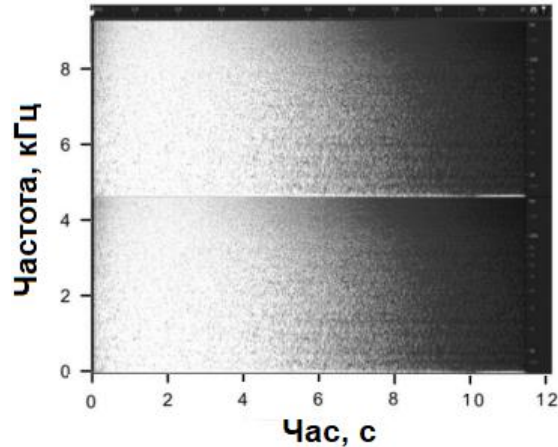


Рисунок 3.6 – Спектрограма імпульсної характеристики для стартового налаштування ревербератора Shimmer

З рис.3.6 видно, що час реверберації перевищує 10 с, та її спектральні характеристики неможливо назвати природними. Сфера застосування даного виду реверберації – джерела сигналу ближнього звукового поля, у тому числі ті, що мають широку стереокартину, що вимагають художньої реверберації, проте не потребують віддалення.

Також реверберація як спецефект дуже успішно поєднується з природною реверберацією, у зв'язку з чим може комбінуватися з нею в художніх цілях.

Спираючись на перераховані вище висновки, можна функціонально розмежувати сфери застосування різних алгоритмів реверберації в контексті створення тривимірної звукової картини фонограми.

Як приклад розглянемо гіпотетичну естрадну композицію, інструментування якої включає ударні інструменти і перкусію, бас, кілька гітар, клавішні педи і вокал. Для цієї композиції нам знадобиться чотири основних ревербератора:

– рум-ревербератор для гітар, оскільки найчастіше вони панорамуються досить широко у стереополі і при цьому не вимагають значного віддалення від вокалу та інших солюючих інструментів, однак повинні розташовуватися трохи позаду;

– хол-ревербератор для інструментів далекого звукового поля, зокрема клавішних педів, короткий плейт-ревербератор (менше 1 с) для ударних та перкусії, оскільки записані індивідуальними мікрофонами ударні інструменти, як правило, монофонічні і при не вимагають віддалення;

– довгий плейт-або спрингревербератор (більше 1 с) для солюючих інструментів та основного вокалу, оскільки вони також, як правило, монофонічні та однозначно є найближчими до слухача інструментами в тривимірному акустичному просторі і зовсім не вимагають віддалення.

Також, у художніх цілях можливе застосування реверберації як спецефект. Наведена методика дозволяє ефективно вибирати алгоритми реверберації за аналогією з наведеним вище прикладом для досягнення максимальної глибини тривимірної звукової картини фонограми.

### 3.3 Дослідження згорткового методу штучної реверберації

Окрім алгоритмічної реверберації існує більш новий тип – згорткова реверберація. В математичному виразі згорткова обробка виконує згортку вхідного сигналу  $x(t)$  з імпульсною характеристикою приміщення  $h(t)$ :

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N+M-2} x(n-k)h(n), \quad (3.3)$$

де  $M$  і  $N$  – число відліків звукового сигналу і імпульсної характеристики, що перемножуються.

Тобто, маючи імпульсну характеристику будь-якого приміщення, можна обчислити реверберацію будь-якого звуку.

В Інтернеті є бібліотеки великої кількості імпульсних відгуків реальних приміщень, наприклад, сайти [34–36].

Дослідження виконано на прикладі імпульсних характеристик концертного залу Порі, Фінляндія (рис.3.7).



Рисунок 3.7 – Концертний зал Porij Promenadikeskus, Фінляндія

На рис.3.8 показано план концертного залу Porij Promenadikeskus. На плані показано розміщення джерел звуку (S1-S3), мікрофонів в області сцени (P1-P3) та мікрофонів в області залу (R1-R4).

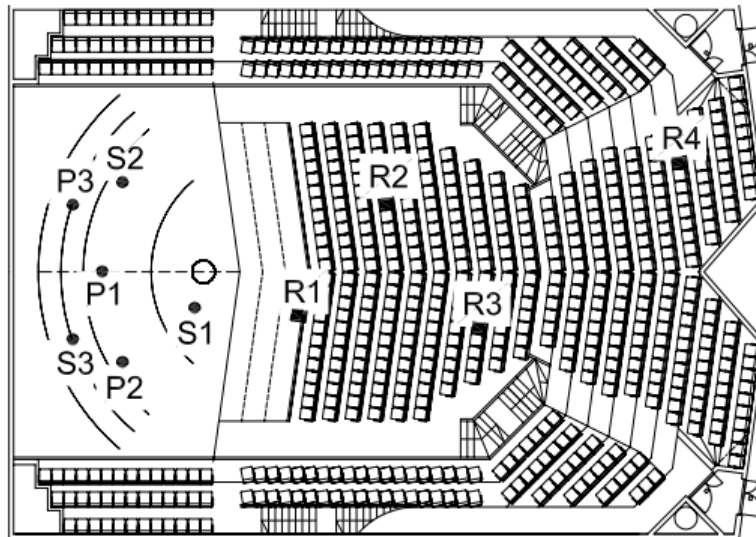


Рисунок 3.8 – План концертного залу Porij Promenadikeskus

В табл.3.1 наведені параметри розташування звукових джерел (S1-S3), мікрофонів в області сцени (P1-P3) та мікрофонів в області залу (R1-R4).

Таблиця 3.1 – Параметри розташування звукових джерел (S1-S3), мікрофонів в області сцени (P1-P3) та мікрофонів в області залу (R1-R4)

Джерела	Розміщення на сцені		Мікрофони	Розміщення на сцені	
	Спереду, м	Від середини, м		Спереду, м	Від середини, м
S1	2,0	1,6 зліва	P1	6,1	0,0
S2	5,2	4,0 справа	P2	5,2	4,0 зліва
S3	7,4	3,0 зліва	P3	7,4	3,0 справа

Мікрофони	Розміщення в залі	
	Ряд	Місце
R1	3	4 зліва
R2	7	6 справа
R3	11	5 зліва
R4	20	8 справа

Завантажені 12 звукових файлів імпульсних характеристик (рис.3.9), що відповідають різним поєднанням поширення звукових сигналів від 3-х джерел до 4-х мікрофонів.

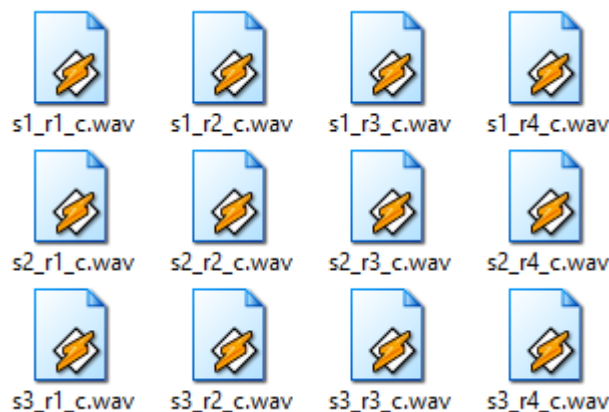


Рисунок 3.9 – Завантажені 12 звукових файлів імпульсних характеристик

Дослідження проведено в програмі Ableton Live за допомогою ревербератора Hybrid Reverb. Це ревербератор, що дозволяє проводити згорткову обробку звуку (рис.3.10).



Рисунок 3.10 – Ревербератор Hybrid Reverb від Ableton Live

Після обробки часова структура сигналів аналізувалася в програмі Audacity по причині більшої наочності. На рис. 3.11 показані імпульсні характеристики s2-r1, s2-r2, s2-r3, s2-r4.

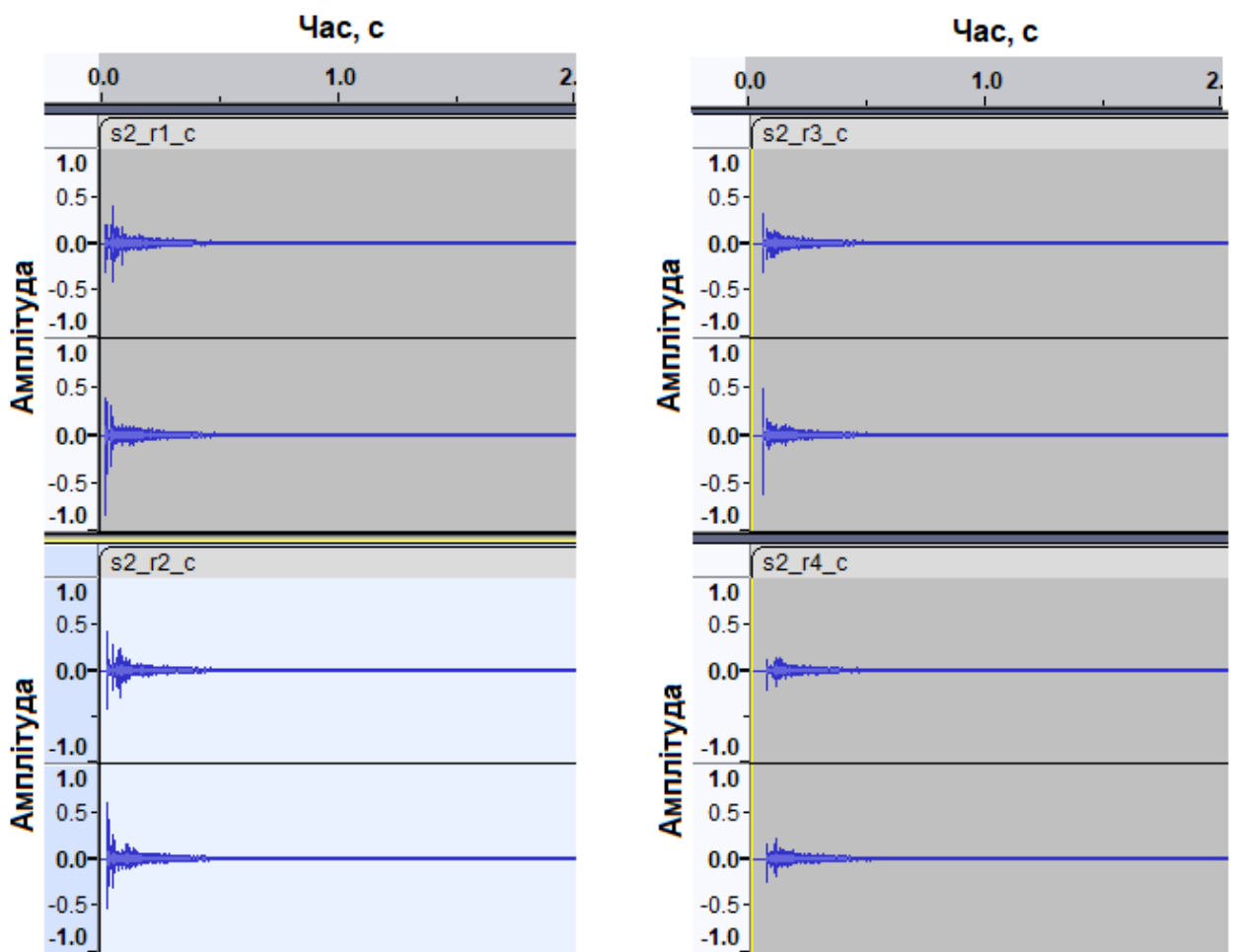


Рисунок 3.11 – Імпульсні характеристики s2-r1, s2-r2, s2-r3, s2-r4

Імпульсні характеристики записані стереомікрофонами по системі XY. З рис.3.11 видно, що стереоканали помітно різняться. Помітно також збільшення часу приходу прямого сигналу і ранніх відбиттів, а також менша амплітуда відгуку при віддаленні від джерела звуку.

На рис.3.12 показані сигнали до і після згорткової обробки. В якості первинного сигналу було обрано голос диктора в студії.

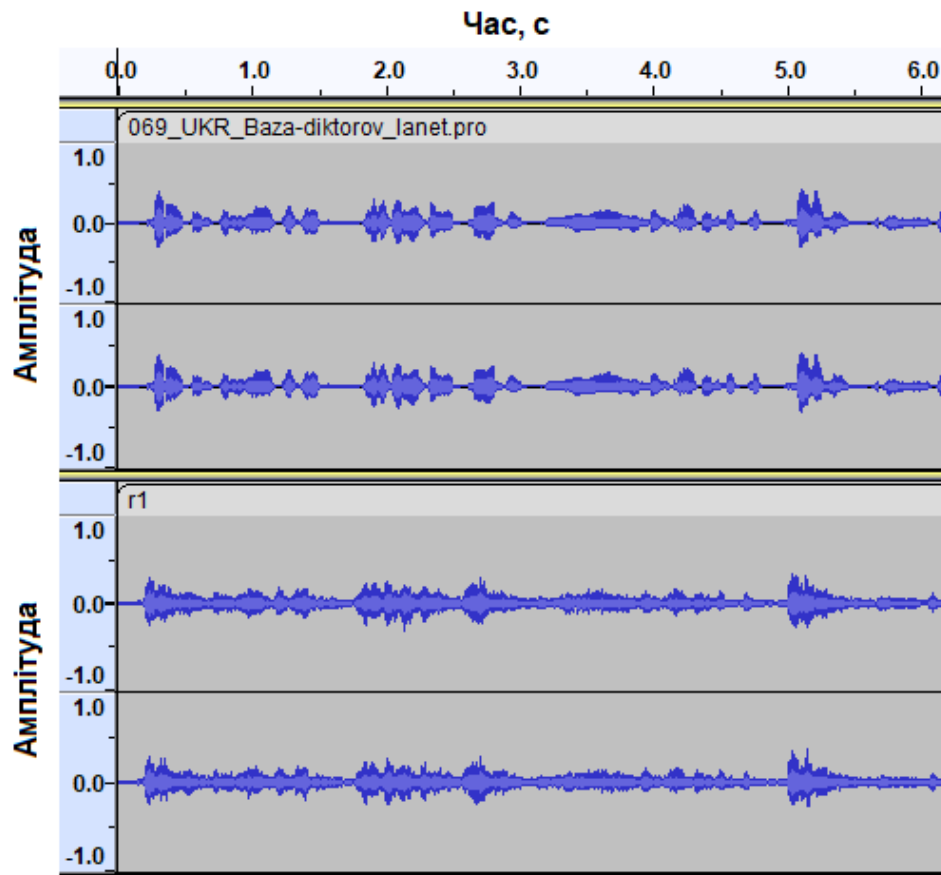


Рисунок 3.12 – Сигнали до і після згорткової обробки

З рис.3.12 помітно, як реверберація залу заповнює паузи між словами. Слуховий аналіз показав розкотистість звуку і його реалістичність, особливо якщо прослуховувати в стереонавушниках.

#### 3.4 Висновки по розділу 3

На перший погляд, стосовно створення ефекту реверберації в контексті обробки звукових сигналів, використання згорткових алгоритмів виглядає як

оптимальний вибір, адже дані алгоритми дозволяють «поміщати» звукові сигнали у природне акустичне середовище, що має сприйматися слухачем як звучання інструменту чи голосу натуральному акустичному просторі. Однак, фізичні властивості даного алгоритму такі, що сама по собі імпульсна характеристика не містить у собі деяку критичну для повноцінного моделювання приміщення інформацію, зокрема, інформацію про нелінійні спотворення та модуляцію вихідного сигналу.

Також, більшість загорткових алгоритмів нездатно працювати навіть з одновимірними масивами імпульсних характеристик, що обмежує динамічні можливості даних алгоритмів. У зв'язку з цим реверберація незважаючи на передбачувану «чистоту» і натуральність звучання виявляється малозастосовною до досить щільних аранжувань, оскільки, просто маскується безліччю більш щільних тембрів у фактурі музичного твору. Також налаштування згорткових ревербераторів вкрай обмежені фізичними властивостями самої операції згортки та неможливістю гнучко відокремити ранні відбиття від пізніх у часовій характеристиці ревербераційного сигналу.

Одним із способів боротьби з вищезгаданими недоліками класичних згорткових алгоритмів є т.зв. «динамічна згортка», суть якої полягає у використанні деяких більш складних базисних функцій (наприклад, вейвлетів) у обчисленнях. Типовим прикладом подібних алгоритмів є Verbsuite Classics або Seventh Heaven від LiquidSonics.

## ВИСНОВКИ

Сьогодні абсолютна більшість фонограм створюються з метою бути відтвореними в першу чергу саме на стереофонічних системах. Велику увагу звукорежисери приділяють створенню просторової картини, де кожне джерело звучання розташоване як по ширині, так і по глибині уявної сцени. Якщо позиціонування по ширині створюється амплітудними та фазовими методами панорамування, то глибина уявного джерела залежить від характеристик реверберації.

У сучасному студійному звукозаписі більшість музичних інструментів та голосів записується в заглушених приміщеннях у ближньому звуковому полі при розташуванні мікрофонів у безпосередній близькості від джерел. Тобто нівелюється навіть мінімальна природна реверберація приміщення. Той же принцип стосується і синтезованих сигналів.

У зв'язку з цим проблема «глибини» фонограми, тобто рознесення у ній джерел звукового сигналу, розташованих у ближньому та дальньому звукових полях є актуальною. Одним із способів вирішення даної проблеми є створення у фонограмі штучного дифузного поля за допомогою застосування різних моделей реверберації.

Мета роботи – на основі теоретичного аналізу процесу реверберації і ревербераційних алгоритмів запропонувати практичну методику вибору ревербераційного алгоритму у контексті зведення музичного матеріалу, виходячи з цілей та завдань позиціонування джерел звукового сигналу у фонограмі.

В першому розділі виконано теоретичний аналіз процесу реверберації звуку та впливу на нього різних факторів. Найбільш повно реверберація описується імпульсним відгуком приміщення. Це реакція приміщення на короткий імпульсний звук, близький до дельта-функції.

Часова структура ревербераційного процесу залежить від взаємного розташування джерела звуку, слухача і перешкод. Сам ревербераційний

процес складається з прямого звуку, первинних відбиттів і суцільного ревербераційного хвоста. Отже, імітуючи даний процес у часі, можна побудувати штучний ревербератор.

У другому розділі проведено теоретичне обґрунтування методів та алгоритмів створення штучної реверберації. Найбільш старими є листові та пружинні ревербератори. В них звук, створений електромеханічними перетворювачами поширюється відповідно по металевому листу, або по пружинах, на границях цих середовищ виникають багатократні перевідбиття, імітуючи процес реверберації. На виході стоять механіко-електричні перетворювачі. Незважаючи на зовнішню примітивність даних методів, аналогічні алгоритми традиційно присутні у всіх сучасних цифрових ревербераторах.

Розглянуто алгоритмічні цифрові ревербератори. Вони будуються на основі ліній затримки, множників і частотних фільтрів. Затримки імітують процес поширення хвиль, множники – затухання при поширенні, частотні фільтри – частотні характеристики коефіцієнту звукопоглинання поверхонь.

Ранні відбиття мають головне значення для просторового сприйняття звуку слухачем, зокрема, ефекту об'єму приміщення. Найчастіше для імітації ранніх відбиттів застосовують алгоритм Герзона. Для формування ревербераційного хвосту застосовують фільтр з нескінченною імпульсною характеристикою.

В роботі представлена загальна схема сучасного цифрового ревербератора. Для порівняння наведено вікно налаштування ревербератора в програмі Audacity. Порівнюючи структурну схему з вікном налаштувань можна знайти відповідні регулювання і зрозуміти, як вони впливають на звуковий сигнал і на загальний характер звучання.

Можна упевнено стверджувати, що в даній роботі зроблено чітко і ясно пояснення відповідності налаштувань програмного ревербератора і його структурної схеми. Навіть виробники програмних продуктів не наводять структурної схеми алгоритмів, обмежуючись лише словесним описом.

В третьому розділі проведено експериментальне дослідження алгоритмів реверберації звуку. Незважаючи на велику кількість пресетів, в алгоритмічних ревербераторах можна виділити чотири основні типи реверберації: рум-реверберація (або кімнатна), хол-реверберація (моделювання концертної зали), плейт-реверберація (листова) і спрінг-реверберація (пружинна). Окремим пунктом виділимо реверберацію як спецефект.

Рум- та хол-реверберація є віддаляючими алгоритмами, тобто їхнє завдання – на деяку відстань суб'єктивно віддалити уявне джерело сигналу. При цьому зовсім не обов'язково віддаляти інструменти, що знаходяться в ближньому звуковому полі. Саме для них допустиме використання в художніх цілях спрінг- та плейт-ревербераторів, що є невіддаляючими.

Отримані імпульсні характеристики двох моделей реверберації, отримані з алгоритмічного ревербератора програми Audacity: Concrete Room (бетонна кімната) та Church (собор).

Якщо слухач відчуває у ревербераційному сигналі явний акцент на ранніх відбиттях і слабовиражений ревербераційний хвіст при невеликій передзатримці *predelay* – він автоматично інтуїтивно визначає для себе цю реверберацію як кімнатну.

Якщо ж у ревербераційному сигналі слабо виражені ранні відбиття при широкій їх стереокартині та великому значенні перед затримки *predelay*, однак при цьому яскраво виражений довгий ревербераційний хвіст, який однозначно сприймається як частина фактури звуку – сигнал сприймається слухачем як суттєво віддалений.

Кімнатну та хол-реверберацію можна використовувати при зведенні однієї і тієї ж фонограми на різних джерелах з метою ефективного поділу їх по осі глибини. В такому разі інструменти, вміщені у кімнатну реверберацію будуть дещо віддалені від інструментів ближнього звукового поля, але їхнє розташування буде значно ближче, ніж у інструментів з хол-реверберацією.

З аналізу листового та пружинного ревербераторів очевидно, що дані типи реверберації позбавлені ранніх відбиттів, отже, така реверберація не може сприйматися людським слухом як природна. Також, певної «штучності» даним ревербераторам додає специфічний «металевий» звук, а також вузька стереокартина ревербераційного сигналу.

Отримано спектрограми імпульсних характеристик хол-ревербератора а також листового та пружинного ревербераторів. Перелічені властивості роблять листову та пружинну реверберацію оптимальним вибором для інструментів ближнього звукового поля. Завдяки вузькій стереокартині їх можна застосовувати на монофонічних джерелах, зокрема вокал, сольні монофонічні інструменти – гітара, скрипка і т.д.

Варто також відзначити той факт, що цифрові листові ревербератори часто мають більшу жорсткість («зернистість») звучання, а отже, більш щільний частотний спектр. У зв'язку з цим логічно припустити, що «цифрові» алгоритми листової реверберації, більш застосовні в щільних, насичених фонограмах, у той час як алгоритми «аналогових» плейт-ревербераторів більш актуальні під час зведення делікатних, фактурно прозорих музичних творів.

Пунктирна лінія на спектрограмі пружинного ревербератора поділяє область корисного спектра ревербераційного сигналу та область гармонік вищих порядків. Характерний ефект вібрації пружин нівелюється зі збільшенням фізичної кількості пружин, що доступно як налаштування у сучасних цифрових рішень. У зв'язку з цим в сучасній, особливо естрадній музиці спрінг-реверберацію можна розглядати як повноцінну альтернативу плейт-реверберації.

Розроблено загальну методику використання ревербераторів при створенні гіпотетичної естрадної композиції, що включає ударні і перкусію, бас, кілька гітар, клавішні і вокал. Визначено рекомендовані параметри і тип ревербераторів, що мають використовуватися при обробці цих треків.

Передовим алгоритмом реверберації вважають згортковий. Якщо відома імпульсна характеристика приміщення, то є можливість шляхом обчислення математичної згортки зі вхідним сигналом отримати реверберований сигнал.

Дослідження виконано на прикладі імпульсних характеристик концертного залу Порі, Фінляндія. Дослідження проведено в програмі Ableton Live за допомогою ревербератора Hybrid Reverb. Після обробки часова структура сигналів аналізувалася в програмі Audacity по причині більшої наочності.

Видно, що стереоканали імпульсної характеристики помітно різняться. Помітно також збільшення часу приходу прямого сигналу і ранніх відбиттів, а також менша амплітуда відгуку при віддаленні від джерела звуку.

Отримані сигнали до і після згорткової обробки. В якості первинного сигналу було обрано голос диктора в студії. Помітно, як реверберація залу заповнює паузи між словами. Слуховий аналіз показав розкотистість звуку і його реалістичність, особливо якщо прослуховувати в стереонавушниках.

На перший погляд, використання згорткових алгоритмів виглядає як оптимальний вибір, адже дані алгоритми дозволяють «поміщати» звукові сигнали у природне акустичне середовище, що має сприйматися слухачем як звучання інструменту чи голосу натуральному акустичному просторі. Однак, фізичні властивості даного алгоритму такі, що сама по собі імпульсна характеристика не містить у собі інформацію про нелінійні спотворення та модуляцію вихідного сигналу.

У зв'язку з цим реверберація незважаючи на передбачувану «чистоту» і натуральність звучання виявляється малозастосовною до досить щільних аранжувань, оскільки, просто маскується безліччю більш щільних тембрів у фактурі музичного твору. Тобто, можна рекомендувати згорткові ревербератори для кіно, фільмів або нещільних музичних композицій з малою кількістю інструментів.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ballou G. Handbook for Sound Engineers (Fourth ed.). – Burlington: Focal Press, 2008. – 43 p.
2. Bartholomew Elias. Sound Basics: A Primer in Psychoacoustics. – United States Air Force Research Laboratory, 1998. – 198 p.
3. Eyring C.F. Reverberation Time in «Dead» Rooms // Journal of The Acoustical Society, Jan. – 1930. – Vol. 1. – P. 217–241.
4. Allen Jont B., Berkley David A. Image Method for Efficiently Simulating Small-room Acoustics // Journal of The Acoustical Society, Jan. – 1979. – Vol. 65. – P. 943–950.
5. Mark Kahrs, Karlheinz Brandenburg. Application of Digital Signal Processing to Audio and Acoustic. Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, London, Moscow. 2002. – 538 p.
6. Rumsey F. Spatial quality evaluation for reproduced sound: terminology, meaning and a scene-based paradigm / Francis Rumsey // Journal Audio Engineering Society, vol. 50, No 9. – September 2002. – C. 655–664.
7. Blauert Y. Prostranstvennyiy sluh: Per. s nem. / Yens Blauert. – M.: Energiya, 1979. – 224 p.
8. Ladoshko O. On existence of optimal boundary value between early reflections and late reverberation /O. Ladoshko, A. Prodeus // Proc. of IEEE 34th International Scientific Conference «Electronic and Nanotechnology», 15-18 April 2014: Proceedings. – Kyiv, 2014. – P. 442-446.
9. Schroeder R.M. New Method of Measuring Reverberation Time / JASA, 1964. – P.409-412.
10. Ratnam R., Jones D.L., Wheeler B.C. et al. Blind estimation of reverberation time / J. Acoust. Soc. Am. – 2003. – Vol. 114, No. 5. – P.2877-2892.
11. Lollmann H., Yilmaz E., Jeub M., and Vary P. An improved algorithm for blind reverberation time estimation / Proc. Intl. Workshop Acoust. Echo Noise Control (IWAENC). – 2010.

12. Lollmann H. Estimation of the Frequency Dependent Reverberation Time by Means of Warped Filter-Banks // Lollmann H., Vary P. / Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP). – 2011. – P.309-312.

13. Nannariello J. The prediction of reverberation time using neural network analysis // Nannariello J., Fricke F. / Appl. Acoust. – 1999. – No.58. – P.305–325.

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. Буйницький Д.В. Апаратно-программний комплекс для дослідження акустических пристроїв // 23-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». – Харків, 16–18 квітня 2019 р. – с. 92-93.

23. Ашихмин В.О. Исследование системы коррекции звука с учётом характеристик помещения // 23-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». – Харків, 16–18 квітня 2019 р. – с. 96-97.

25. Тушев В.О. Исследование влияния фазовых искажений аудиоаппаратуры на качество звучания // 23-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». – Харків, 16–18 квітня 2019 р. – с. 84-85.

26. Чернов К.А. Исследование акустических характеристик студии звукозаписи // 23-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». – Харків, 16–18 квітня 2019 р. – с. 94-95.

27. Ашихмін В.О. Адаптивні методи подавлення акустичного зворотного зв'язку: атестаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2019 р. – 69 с.

28. Буйницький Д.В. Дослідження методів компенсації ревербераційних завад: атестаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2019 р. – 67 с.

29. Шевченко П.Д. Система вимірювання та аналізу акустичних характеристик приміщень: атестаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2019 р. – 68 с.

30. Лісовий Р.О. Комплексне дослідження акустичних характеристик студійного приміщення: атестаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2019 р. – 81 с.

31. Древальський Р.В. Дослідження методу корекції звука 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.

32. Rumsey F. Spatial quality evaluation for reproduced sound: terminology, meaning and a scene-based paradigm / Francis Rumsey // Journal Audio Engineering Society, vol. 50, No 9. – September 2002. – С. 655–664.

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

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

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