

УДК 78:004.4'277.4.

DOI <https://doi.org/10.32782/ART/2023-2-3>

ВИКОРИСТАННЯ КОНВОЛЮЦІЙНИХ РЕВЕРБЕРАТОРІВ У СУЧАСНІЙ ЗВУКОРЕЖИСУРІ

Єгоров Володимир Сергійович

магістрант кафедри естрадної музики

Рівненського державного гуманітарного університету

ORCID ID: 0009-0006-7709-3913

e-mail: explorabbit@gmail.com

У запропонованій статті розглядається технологія конволюційних ревербераторів і їх застосування в сучасній звукоорежисурі. Основою конволюційних ревербераторів є математичний метод, який дозволяє емулювати реверберацію приміщень, акустичні властивості яких були виміряні та записані у вигляді імпульсних характеристик. Охарактеризовано принципи роботи конволюційних ревербераторів, їх генезу, сфери застосування та переваги порівняно зі звичайними ревербераторами. Детально розглядається використання цих процесорів у різних галузях, як-от музична та кінопромисловість, аудіовізуальні ігри, розважальні заклади. Також аналізуються потенційні перспективи використання цієї технології в майбутньому. Надається детальний огляд конволюційних ревербераторів, що може допомогти звукоорежисерам і аудіоінженерам зрозуміти, як правильно використовувати цю технологію для створення враження простору та реалістичного звучання. У статті досліджені основні принципи роботи конволюційних ревербераторів, включаючи їх математичну теорію та засновані на цій теорії алгоритми. Окрім того, розглянуті практичні аспекти використання конволюційних ревербераторів, включаючи підготовку й обробку імпульсних характеристик приміщень, вибір правильних параметрів для досягнення бажаного звучання, техніки створення реалістичного віртуального простору.

Ключові слова: *аудіотехнології, студійна робота, обробка аудіосигналів, цифрові звукові ефекти, цифрова обробка звуку.*

CONVOLUTION REVERBERATORS IN MODERN SOUND ENGINEERING

Volodymyr Yehorov

Rivne State University of the Humanities

Sound engineering is an extremely important component of the music and film industry, as well as any other industry related to audio. One of the most important aspects of sound engineering is creating the effect of the audience's presence in the room during sound playback. This is where convolution reverbs come to the rescue. In this scientific article, we thoroughly examine the technology of convolution reverbs and their application in modern sound engineering. The basis of convolution reverbs is a mathematical method that allows the emulation of the reverb of rooms whose acoustic properties have been measured and recorded in the form of impulse responses. The article will discuss the principles of operation of convolution reverbs, their history, areas of application, and advantages compared to conventional reverbs. Moreover, we will delve into the use of convolution reverbs in various industries such as music and film, audio-visual games, and entertainment venues. We will also explore potential future prospects for the use of this technology. The aim of this article is not only to provide a detailed overview of convolution reverbs, but also to help sound engineers and audio engineers understand how to use this technology correctly to create a sense of space and realistic sound. The article will investigate the basic principles of convolution reverbs, including their mathematical theory and algorithms based on this theory. Additionally, practical aspects of using convolution reverbs will be discussed, such as preparation and processing of impulse responses of rooms, selection of the appropriate parameters to achieve the desired sound, and techniques for creating a realistic virtual space. Overall, this article provides an overview of convolutional reverberators and their applications in modern sound engineering. It explores the mathematical theory and practical aspects of using convolutional reverberators to create a realistic sense of space and sound.

Key words: *audio technology, studio work, audio signal processing, digital sound effects, digital sound processing.*

Постановка проблеми. Точне відтворення природних акустичних властивостей різних середовищ є наявною проблемою для звукорежисерів через обмеження традиційних методів обробки звуку. Складні реверберації та відбиття, унікальні для кожного середовища, неможливо точно відтворити за допомогою цих методів, що може обмежити творчі можливості звукорежисерів і негативно вплинути на якість записів.

Щоб подолати ці обмеження, конволюційні ревербератори стали потужним рішенням. У цих новітніх ефектах обробки використовується математичний метод, відомий як згортка, для обробки записаного аудіосигналу з імпульсною характеристикою потрібної кімнати чи середовища. Ця імпульсна характеристика репрезентує акустичні властивості середовища в часовій сфері, описує, як звукові хвилі поведуться в цьому конкретному просторі. Конволюційні ревербератори можуть моделювати й емулювати ці акустичні властивості, включаючи час загасання, частотну характеристику й інші характеристики середовища. На додаток до широкого використання у звукотехніці, ці ревербератори знайшли застосування в архітектурній акустиці, акустичних дослідженнях і віртуальній реальності.

Важливість якості й ефективності звуку в цифрових медіа та створенні контенту робить конволюційні ревербератори ключовим інструментом для звукорежисерів і продюсерів. Забезпечуючи більшу точність записів і творчих проєктів, цей тип обробки може відкрити нові творчі можливості та підвищити загальну якість аудіоматеріалу.

Мета статті – дослідити конволюційні ревербератори, з'ясувати їхні переваги над звичайними процесорами ефектів щодо створення реалістичної звукової сцени.

Аналіз досліджень. Дослідження конволюційних ревербераторів здійснювались у країнах Заходу вже протягом декількох десятиліть. Це розглянуто в дослідженні “An Overview of Convolution Reverb” (автори Daniel Courville та Carl Shutoff із Berklee College of Music). У цій праці описано методи створення імпульсних відгуків (Impulse Response (далі – IR)), включаючи запис реальних приміщень і синтез штучних IR. Були досліджені різні алгоритми для обробки IR та їх оптимізація для роботи в реальному часі.

Дослідження в цій галузі осягають не тільки алгоритми й оптимізацію, але й розроблення апаратури для запису IR. Наприклад, у дослідженні “Measurement and analysis of a reverberation room with maximum volume of 5 m³” від Річарда Шреїера зі Швейцарської федеральної інституції технологій в Цюриху розглядається оптимізація мініатюрної камери звукової реверберації. Інші дослідження, як-от “Measurement of Room Impulse Responses using MLS Signals” від Jörgen Jansson і

David Griesinger зі Шведського інституту звуку та вібрацій, вивчали методіку вимірювання IR з використанням максимально довгих послідовностей максимальної довжини (MLS).

Також були досліджені інтерактивні конволюційні реверберації. У роботі “Real-Time Convolution of Head-Related Transfer Functions” автора Sascha Spors із Технічного університету (м. Берлін) описується інтерактивна реверберація, яка враховує особливості форми вуха та голови слухача. Компанія “Waves Audio” також випустила VST плагін IR-Live, який дозволяє застосовувати інтерактивну конволюцію для створення реалістичних звукових ефектів у реальному часі. Дослідження також проводилися в університеті Іллінойсу, де було розроблено інтерактивну систему конволюційної реверберації для використання в ігровій індустрії.

Щодо оптимізації та якості конволюційних реверберацій, компанія “Universal Audio” досліджувала використання різних алгоритмів і оптимізацію обчислень для поліпшення якості звуку й ефективності роботи плагінів. Університет Стенфорда також проводив дослідження з оптимізації конволюційних реверберацій і їх застосування в аудіоіндустрії. Окрім того, дослідження проводилися в компанії “Waves Audio”, де було розроблено апаратну збірку IR-1, яка дозволяє зберігати та застосовувати великі банки IR у реальному часі. Університет Макгілла проводив дослідження з використанням штучного інтелекту для автоматичної генерації конволюційних IR.

Загалом, дослідження в галузі конволюційних реверберацій проводилися в багатьох університетах і компаніях у західних країнах світу, досліджувалися різні аспекти, зокрема і створення IR, якість, оптимізація, апаратура для запису, алгоритми й інтерактивність. Усе це говорить про чисельну наявність матеріалу, які є підґрунтям для використання конволюційних ревербераторів у багатьох ситуаціях, які можуть виникнути в сучасній звукорежисурі.

Виклад основного матеріалу. Генеза конволюційних реверберацій у музичному виробництві починається з кінця 1990-х рр., коли Sony випустила перший у реальному часі конволюційний процесор DRE S777 (Brown, 2020). Ця технологія була значним поліпшенням порівняно з ранішніми процесорами цифрової реверберації, які базувалися на кількох затримках звуку зворотного зв'язку та не забезпечували таких реалістичних результатів, як конволюційна реверберація. Вона швидко набула популярності в музичній індустрії, багато компаній почали розробляти свої власні плагіни з конволюційною реверберацією. Один із найпопулярніших плагінів початку XXI ст. – плагін Altiverb, який був розроблений компанією “Audio Ease” і випущений у 2001 р. Altiverb

містить велику бібліотеку імпульсних відгуків з реальних просторів, як-от концертні зали, катедри та студії звукозапису.

З розвитком технологій покращились якість і ефективність обробки конволюційної реверберації. Нині DSP-базовані конволюційні процесори можуть обробляти імпульси в реальному часі, що дозволяє використовувати конволюційну реверберацію як на концертах, так і у студії (Kantorik, 2014). Ці процесори стали невід’ємним інструментом для музичних продюсерів та інженерів, дозволяють їм відтворювати акустику реальних (записаних) просторів і створювати відчуття глибини та простору у своїх записах.

Основним елементом конволюційних ревербераторів є імпульсна відповідь (імпульсна характеристика) приміщення, яку можна отримати за допомогою запису короткого звукового імпульсу в цьому приміщенні та подальшого його аналізу. Отриману імпульсну відповідь можна використовувати для моделювання звукової характеристики цього приміщення (Kantorik, 2014). За допомогою імпульсної відповіді та принципу згортки сигналів конволюційний ревербератор може створювати реверберацію (затримку та поширення звуку у приміщенні) й луни, які є характерними для конкретного приміщення.

Загальна теорія конволюційних ревербераторів базується на математичних поняттях згортки сигналів, Фур’є-аналізу та частотній області звукового сигналу. Це дозволяє досягти високої реалістичності звукового ефекту шляхом симуляції природних відбивань звукових хвиль у приміщенні. Сигнал, що надходить від джерела звуку,

оброблюється за допомогою імпульсної відповіді приміщення (IR), яка зберігає інформацію про затримку й амплітуду звукових відбиттів від різних поверхонь приміщення (Young, 2020). У разі згортання сигналів один сигнал, який називається «імпульсною відповіддю», перемножується з іншим сигналом, який називається «вхідним сигналом», та після цього інтегрується. Цей імпульс згортається зі вхідним звуковим сигналом, що створює ілюзію присутності у приміщенні.

Є багато інших технічних деталей і математичних концепцій, які використовуються в роботі з конволюційними ревербераторами. Наприклад, важливим аспектом є вибір вікна для згортки, а також розмір згорткової матриці. Згорткова матриця та вікно – це внутрішні алгоритми, які використовуються під час згортання «сухого» сигналу з відповіддю ідеального ревербераційного середовища, щоб отримати сигнал реверберації. Вікно згортки використовується для зменшення артефактів, які можуть виникнути під час згортки. Розмір згорткової матриці має бути досить великим, щоб забезпечити точний результат, проте надто великий розмір може призвести до зайвого споживання ресурсів і затримок у часі обробки (Young, 2020).

Конволюційні реверберації дозволяють змодельовувати різні приміщення, створюючи враження, що звук був записаний у цьому конкретному просторі. Наприклад, для створення ефекту присутності великого залу можна використати конволюційний ревербератор з відповідним імпульсним відгуком. Аналогічно, для створення ефекту присутності в невеликому приміщенні можна

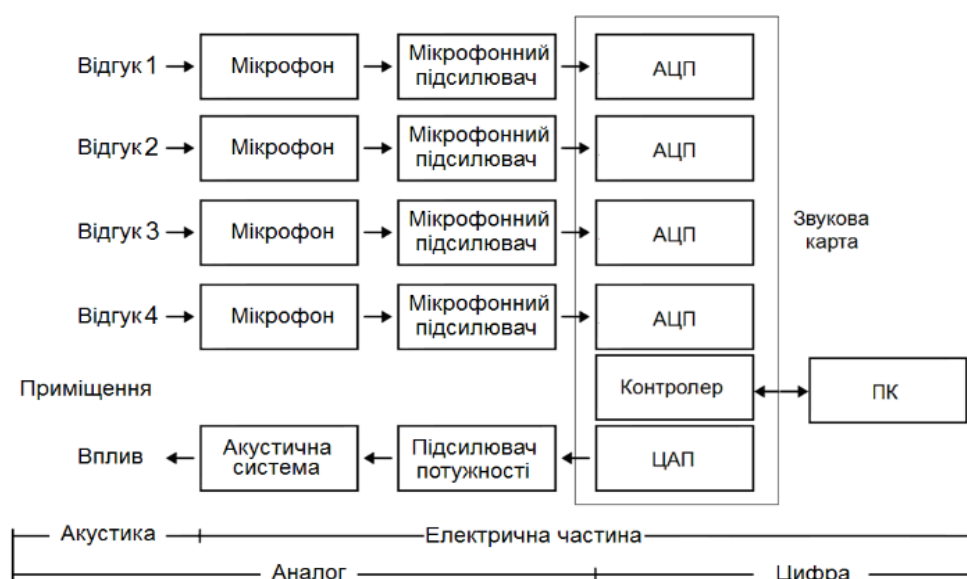


Рис. 1. Схема запису імпульсного відгуку (IR) для використання в конволюційному ревербераторі

використати інший імпульсний відгук (Kantorik, 2014). У запропонованій статті важливо згадати про технології VST та DAW, оскільки вони відіграють важливу роль застосування реверберацій у звукозаписі та звукорежисурі.

VST (Virtual Studio Technology) є стандартом для плагінів аудіопрограм, які дозволяють розширювати їхні можливості шляхом додавання нових ефектів, інструментів та інших функцій. Використання плагінів VST для конволюційних реверберацій дозволяє користувачеві з легкістю налаштовувати параметри ефектів і додавати їх до своїх проєктів у Digital Audio Workstation (далі – DAW). Digital Audio Workstation – це програмне забезпечення для запису, редагування та мікшування аудіоматеріалів. Використання DAW дозволяє музикантам і звукорежисерам створювати музику, налаштовувати звук і ефекти, додавати інструменти та плагіни, включаючи конволюційні реверберації. DAW забезпечує інтерфейс для налаштування та керування параметрами реверберації.

Кіно широко користується технологія конволюційної реверберації (Юдова-Романова, Стрельчук, Чубукова, 2019). Наприклад, у фільмах різного хронометражу для розширення та покращення звучання окремих сцен, які цього потребують за художнім задумом. В основному це вже робиться на стадії постпродакшну, після того, як аудіоматеріал для фільму вже було записано та змонтовано, що надає простору для ревізій, якщо буде така потреба.

У відеоіграх конволюційні реверберації використовуються для створення звукової атмосфери та забезпечення реалістичного звучання сцен у грі (Pohl, 2019). Вони можуть бути використані для моделювання акустичних характеристик різних середовищ, наприклад, джунглів, печер, міст, кімнат тощо. Також для створення ефектів звуку, як-от луна, затухання, звукові модифікації тощо. У віртуальній реальності, де користувач може інтерактивно взаємодіяти з віртуальним середовищем, конволюційні реверберації можуть допомогти у створенні більш імерсійного звукового досвіду. Вони можуть бути використані для моделювання акустичних властивостей різних об'єктів і середовищ, як-от стіни, двері, підлога, стелі тощо, щоб забезпечити більш реалістичне звучання та збільшити занурення.

Процесори можуть бути задіяні у створенні аудіовізуальних інсталяцій (Ужинський, 2012, с. 127–130), де звук і зображення поєднуються, щоб створити багатограний художній досвід. Наприклад, використані для створення звукового середовища, яке відтворює абстрактні або фантастичні місця, як-от космос, підводний світ, фантастичні ландшафти тощо.

Переваги конволюційних ревербераторів:

– висока точність: здатні відтворювати точний звук майже будь-якого приміщення, яке можна записати у вигляді імпульсної відповіді. Оскільки

вони базуються на реальних вимірах і зразках звуку з реальних приміщень;

– більш реалістичне звучання: дозволяють відтворити реальне звучання приміщень, тому що вони враховують всі аспекти акустики, включаючи розташування мікрофонів і динаміків, форму та розмір приміщення та його властивості;

– більш проста робота: не потребують обов'язкових додаткових налаштувань, оскільки вони вже містять інформацію про звук приміщення (Brown, 2020);

– місце для експериментів: замість імпульсної відповіді можна використовувати будь-які інші аудіофайли, які підходять для алгоритму згортки. Таким чином можна досягнути таких унікальних ефектів звукової виразності, які просто неможливі в інших ситуаціях (Deruty, 2013).

Недоліки конволюційних ревербераторів:

– одним з основних недоліків конволюційних ревербераторів є обмежена гнучкість у налаштуванні параметрів реверберації. Відтворення звуку за допомогою конволюції може забезпечити точне та реалістичне відтворення реверберації приміщення, але воно обмежує можливості налаштування деяких параметрів, як-от форма та час розгортання реверберації, що можуть бути важливими в музичному продукті або в інтерактивному досвіді;

– вимоги до обчислювальних ресурсів. Даний ефект обробки може бути вимогливим до обчислювальних ресурсів (Корякін, 2021). Чим більший файл імпульсної відповіді, тим більш потужним має бути обчислювальний пристрій для його обробки. Це може створити проблеми для використання конволюційних реверберацій у вбудованих системах або на слабких комп'ютерах за використання DAW;

– обмеженість відтворення ефекту реверберації. Хоча реверберації можуть точно відтворювати реверберацію певного приміщення, вони не можуть відтворити реверберацію, яка не була семплована у вигляді імпульсної відповіді. Наприклад, якщо користувач хоче емулювати реверберацію на відкритому просторі, конволюційний ревербератор не зможе точно відтворити цей ефект;

– залежність від якості IR: оскільки імпульсна відповідь є аудіозаписом, вона має такі самі потенційні проблеми, як і будь-який інший записаний аудіоматеріал. Неякісні IR, які містять шуми та спотворення, зроблені з порушенням технології запису, напряду впливають на якість реверберації при застосуванні таких імпульсних відповідей.

Перспективи розвитку в напрямі конволюційної реверберації. Конволюційні реверберації є невід'ємною частиною музичної та звукової продукції, їх застосування майже необмежене. Далі наведено деякі з перспектив застосування та розвитку таких ревербераторів:

– удосконалення якості обробки сигналу. З розвитком технологій DSP та високопродуктивних процесорів можна очікувати подальшого вдосконалення якості обробки сигналу в реальному часі, що забезпечує більш точне та реалістичне моделювання звукових просторів;

– використання у віртуальній реальності та ігровій індустрії. Конволюційні реверберації можуть бути використані для створення реалістичних звукових просторів у віртуальній реальності та в ігровій індустрії. Це може створити більш імерсійний досвід для гравців і користувачів;

– використання в обробці співочих голосів. Конволюційні реверберації можуть бути використані в обробці вокалу для створення більш реалістичного звучання. Це може бути корисним для озвучення фільмів і відеоігор, а також для покращення звуку на живих виступах;

– розвиток нових алгоритмів і програмних засобів. Розвиток нових алгоритмів і програмних засобів для обробки імпульсних відгуків.

Висновки. Протягом останніх двох десятиліть конволюційні реверберації стали невід’ємною частиною музичного виробництва й аудіоінженерії. Вони дають можливість відтворювати акустичні характеристики реальних просторів і створювати

враження простору та глибини в записах. Було проведено значну кількість досліджень щодо створення IR, якості, оптимізації, апаратури для запису та розширення можливостей застосування конволюційних реверберацій, включаючи роботу з інтерактивними медіа. Натепер у музичній індустрії є багато різних плагінів із конволюційними ревербераціями, що дозволяє аудіоінженерам використовувати їх на практиці в різних проєктах. З розвитком технологій також зростають якість і ефективність обробки звуку за допомогою конволюційних реверберацій, зокрема й завдяки використанню DSP-процесорів для обробки IR у реальному часі.

Перспективи подальших досліджень розвитку конволюційних реверберацій полягають у поліпшенні якості та швидкості обробки, розширенні бібліотек IR, використанні більш складних алгоритмів і методів машинного навчання для створення нових типів реверберацій та підвищення їхньої реалістичності, а також у розширенні можливостей застосування в інтерактивних технологіях. Загалом, конволюційні реверберації є важливим інструментом для створення професійної аудіопродукції та музики, їхнє значення тільки зростатиме з розвитком технологій та збільшенням вимог до якості звуку.

Література:

Корякін О. Теоретико-методичні засади використання штучної реверберації у сучасній звукорежисурі. *Вісник Національної академії керівних кадрів культури і мистецтв*: науковий журнал. Київ: Міленіум, 2021. № 45. С. 291–297.

Ужинський М. Творче застосування процесорів ефектів у мистецькому просторі. *Вісник Харківської державної академії дизайну і мистецтв. Мистецтвознавство. Архітектура*: збірник наукових праць. Харків: ХДАДМ, 2012. № 4. С. 127–130.

Юдова-Романова К., Стрельчук В., Чубукова Ю. Режисерські інновації у використанні технічних засобів і технологій у сценічному мистецтві. *Вісник Київського національного університету культури і мистецтв. Серія «Сценічне мистецтво»*. № 2 (1). 2019. С. 52–72.

Brown G.A. History of Reverb in Music Production by, iZotope Content Team May 1, 2020.

Deruty E. Creative Convolution: New Sounds From Impulse Responses. SOS, Sept. 2010. Web. Oct. 2013.

Kantorik S. Convolution reverb & impulse responses. Capstone Projects and Master’s Theses. 365, 2014.

Pohl I. et al. Spatial room acoustic visualization using virtual reality. Applied Sciences, 9 (18), 3823, 2019.

Young O. Creating a Convolution Reverberation Effect from Impulse Responses in Physical Spaces, 2020.

References:

Koriakin O. (2021). Teoretyko-metodychni zasady vykorystannia shtuchnoi reverberatsii u suchasni zvukorezhysuri [Theoretical and methodological principles of using artificial reverberation in modern sound engineering]. *Visnyk Natsionalnoi akademii kerivnykh kadriv kultury i mystetstv: nauk. zhurnal*. Kyiv: Milenium, 291–297 [in Ukrainian].

Uzhynskiy M. (2012). Tvorche zastosuvannia protsesoriv efektiv u mystetskomu prostori [Creative use of effects processors in the artistic space]. *Visnyk Kharkivskoi derzhavnoi akademii dyzainu i mystetstv. Mys-tetstvovnavstvo. Arkhitektura: zb. nauk. prats*. Kharkiv: KhDADM, 127–130 [in Ukrainian].

Iudova-Romanova K., Strelchuk V., Chubukova Yu. (2019). Rezhyserski innovatsii u vykorystanni tekhnichnykh zasobiv i tekhnolohii u stsenichnomu mystetstvi [Director’s innovations in the use of technical means and technologies in stage art]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu kultury i mystetstv. Seriya “Stseni-chne mystetstvo”*. 2 (1). S. 52–72 [in Ukrainian].

Brown G. (2020). A History of Reverb in Music Production by, iZotope Content Team May 1.

Deruty E. (2013). Creative Convolution: New Sounds From Impulse Responses. SOS, Sept. 2010. Web. Oct.

Kantorik S. (2014). Convolution reverb & impulse responses. Capstone Projects and Masters Theses. 365.

Pohl I. et al. (2019). Spatial room acoustic visualization using virtual reality. Applied Sciences, 9 (18), 3823.

Young O. (2020). Creating a Convolution Reverberation Effect from Impulse Responses in Physical Spaces.