

УДК 519.6:534.2:004.94

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2025-1-24>

Сергій ПРИХОДЧЕНКО

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу та управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького 19, Дніпро, Україна, 49005

ORCID: 0000-0002-6562-0601

Scopus Author ID: 57201251400

Ларуса КОРЯШКІНА

доктор технічних наук, доцент, професор кафедри системного аналізу та управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького 19, Дніпро, Україна, 49005

ORCID: 0000-0001-6423-092X

Scopus Author ID: 55844269100

Ольга ШЕВЦОВА

PhD, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005

ORCID: 0000-0002-0148-5877

Scopus Author ID: 57220267804

Євгеній ЗАГИНАЙЛО

аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005

ORCID: 0009-0004-5109-2053

Бібліографічний опис статті: Приходченко, С., Коряшкіна, Л., Шевцова, О., Загинайло, Є. (2025). Програмне моделювання акустичних коливань у замкненому просторі. 177–185, doi <https://doi.org/10.32782/IT/2025-1-24>

ПРОГРАМНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АКУСТИЧНИХ КОЛИВАНЬ У ЗАМКНЕНОМУ ПРОСТОРІ

Представлено програмне забезпечення, розроблене для моделювання і аналізу акустичного середовища.

Метою є розробка програмного забезпечення моделювання і аналізу складних акустичних процесів у замкнених середовищах і прискорення його роботи за рахунок модульної архітектури, розпаралелювання обчислень та багатопотокової обробки даних при чисельній реалізації граничних задач для рівнянь акустики.

Методологія. Використовується модульний підхід щодо розробки архітектури програмного забезпечення. Комп'ютерне моделювання поширення звукових хвиль базується на основах математичної фізики та методах скінченних і граничних елементів для розв'язання рівнянь акустики. Для прискорення роботи застосовуються механізми підтримки паралельних обчислень.

Наукова новизна полягає у розробці програмного забезпечення для симуляції звукових хвиль з модульною архітектурою, яка включає крайові задачі для рівнянь акустики, методи їх чисельного аналізу та інтерактивну візуалізацію результатів, з можливістю розпаралелення обчислень під час розв'язання рівнянь математичної фізики.

Висновки. Досліджено методи симуляції звукових хвиль. Розроблено програмне забезпечення, у якому особлива увага приділяється локалізації звукових джерел за допомогою мікрофонних масивів і оптимізації алгоритмів для обробки складних акустичних сценаріїв. Представлене рішення орієнтоване на широкий спектр застосувань, включаючи дослідження фізики звуку та проектування інтелектуальних систем.

Ключові слова: акустичне моделювання, звукові хвилі, чисельні методи, мікрофонні масиви, локалізація звукових джерел.

Serhii PRYKHODCHENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, Ukraine, 49005, prykhodchenko.s.d@nmu.one

ORCID: 0000-0002-6562-0601

Scopus Author ID: 57201251400

Larysa KORIASHKINA

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, Ukraine, 49005, koriashkina.l.s@nmu.one

ORCID: 0000-0001-6423-092X

Scopus Author ID: 55844269100

Olha SHEVTSOVA

PhD, Associate Professor at the Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, shevtsova.o.s@nmu.one

ORCID: 0000-0002-0148-5877

Scopus Author ID: 57220267804

Yevhenii ZAHYNAILO

Postgraduate Student at the Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, Ukraine, 49005, Zahynailo.Yev.O@nmu.one

ORCID: 0009-0004-5109-2053

To cite this article: Prykhodchenko, S., Koryashkina, L., Shevtsova, O., Zaginaylo, Ye. (2025). Prohramne modeliuвання akustychnykh kolyvan u zamknenomu prostori [Software modeling of acoustic vibrations in a closed space]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 177–185, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2025-1-24>

SOFTWARE MODELLING OF ACOUSTIC VIBRATIONS IN CONFINED SPACES

The paper presents software developed for modelling and analysing the acoustic environment.

The aim is to develop software for modelling and analysing complex acoustic processes in confined environments and to accelerate its operation due to modular architecture, parallelisation of computations and multi-threaded data processing in the numerical implementation of boundary value problems for acoustic equations.

Methodology. A modular approach to the development of software architecture is used. Computer modelling of sound wave propagation is based on the fundamentals of mathematical physics and finite and boundary element methods for solving acoustic equations. Mechanisms to support parallel computing are used to speed up the work.

The scientific novelty lies in developing software for sound wave simulation with a modular architecture that includes boundary value problems for acoustic equations, methods for their numerical analysis, and interactive visualisation of results, with the possibility of parallelising computations when solving mathematical physics equations.

Conclusions. Methods of sound wave simulation have been investigated. The software has been developed with a special focus on localising sound sources using microphone arrays and optimising algorithms for processing complex acoustic scenarios. The presented solution is focused on a wide range of applications, including sound physics research and intelligent systems design.

Key words: Acoustic modelling, Sound waves, Numerical methods, Microphone arrays, Sound source localization.

Вступ. Дослідження локалізації об'єктів, що генерують звукові коливання, за допомогою набору мікрофонів, фізично розташованих у різних точках, є одним з ключових напрямів у сучасних технологіях моделювання акустичного середовища, оскільки дозволяють вирішувати низку фундаментальних задач нетрадиційними методами звукового аналізу, і відкривають можливості для створення систем, здатних

ефективно взаємодіяти з навколишнім середовищем.

Розподілені мікрофонні масиви надають тривимірну перспективу звукового поля і слугують для точного визначення місцезнаходження джерела звуку в просторі. Це важливо, зокрема, під час розробки програмного забезпечення роботів або систем розумних будинків. Роботам потрібно, приміром, орієнтуватися у фізичному

просторі для знаходження людини, яка потребує допомоги, а системам моніторингу – ідентифікувати небезпечні ситуації, такі як падіння предмету чи розбиття скла.

Інтеграція з методами машинного навчання, зокрема глибокими нейронними мережами, сприяє розвитку самонавчальних інтелектуальних систем, які взаємодіють із навколишнім світом і підвищують ефективність технологій. Глибокі нейронні мережі, які застосовуються для обробки звукових сигналів, дозволяють навчати моделі на складних даних і отримувати більш точні результати локалізації. Це сприяє створенню самонавчальних систем, які адаптуються до нових середовищ і типів звуків, забезпечуючи універсальність і масштабованість таких технологій. Крім того, локалізація звукових об'єктів за допомогою розподілених мікрофонних масивів є важливим компонентом багатьох сучасних і перспективних технологій, сприяючи розвитку інтелектуальних систем, що взаємодіють із навколишнім світом. Ця сфера досліджень поєднує передові методи обробки сигналів, машинного навчання та робототехніки, відкриваючи нові можливості для поліпшення якості життя і підвищення ефективності технологій.

Метою роботи є вдосконалення технологій акустичного аналізу шляхом розробки та впровадження програмного забезпечення моделювання і аналізу складних акустичних процесів у замкнених середовищах і прискорення його роботи за рахунок модульної архітектури, розпаралелювання обчислень та багатопотокової обробки даних при чисельній реалізації граничних задач для рівнянь акустики.

Об'єктом дослідження є процес поширення звукових хвиль у замкненому середовищі з урахуванням характеру віддзеркалення звуку від перешкод та огорож.

Предметом дослідження є програмне забезпечення симуляції акустичного середовища у замкнених просторах.

Постановка проблеми. Проблема моделювання локалізації об'єктів, що генерують звукові коливання, за допомогою набору мікрофонів, фізично розташованих у різних точках, полягає у складності точного визначення координат звукових джерел у середовищі. Основний виклик у цьому завданні пов'язаний з необхідністю обробки звукових сигналів, які можуть бути спотворені шумом, реверберацією або перекриттям кількох джерел. Кожен мікрофон у системі сприймає звук із затримкою, що залежить від його відстані до джерела, і ці затримки потрібно враховувати для обчислення

координат об'єкта. Проте, через фізичні обмеження середовища, таких як відбиття звуку від стін або інших об'єктів, ці затримки часто містять значний рівень шуму та помилок.

Додатково, проблема ускладнюється тим, що звукові джерела можуть рухатися, створювати звуки різної інтенсивності та частотного спектра. Це вимагає від моделі здатностей адаптуватися до динамічних змін і забезпечувати високу точність локалізації навіть за нестабільних умов. Використання багатоканальних мікрофонів дозволяє зменшити неоднозначність у визначенні напрямку звуку, проте вимагає складних алгоритмів для синхронізації й обробки великого обсягу даних.

У статті (Приходченко та ін, 2024) запропонована архітектура програмного забезпечення для моделювання поширення звукових хвиль з багаторівневою модульною організацією. В даній роботі, яка є продовженням вказаної, представлені результати роботи такого програмного забезпечення, висвітлюючи його переваги, і аналізуючи напрями можливого удосконалення.

Літературний огляд. Математичні моделі та методи, застосовані у системі симуляції звукових хвиль, базуються на фундаментальних фізичних законах, що описують поширення звуку у середовищі. Основу розрахунків становить хвильове рівняння, яке відображає просторово-часову поведінку звукових хвиль у середовищах з різними фізичними характеристиками. Для більш детального аналізу використовуються розширені моделі, зокрема рівняння Гельмгольца для гармонійних хвиль або рівняння Нав'є-Стокса, що враховують взаємодію звуку з потоками рідин або газів у складних умовах.

Робота (Scheibler, Bezzam & Dokmanic, 2017) присвячена Pyroomacoustics – Python-пакету, призначеному для моделювання акустичних середовищ і обробки сигналів за допомогою мікрофонних масивів. Він надає інструменти для симуляції реверберації, моделювання віддзеркалень у приміщеннях та аналізу сигналів в умовах кімнатної акустики. Пакет підтримує алгоритми, як-от Beamforming і Direction of Arrival (DOA), забезпечуючи їхню інтеграцію в дослідницькі та прикладні проекти. Завдяки простоті використання і гнучкості, Pyroomacoustics широко застосовується в аудіотехнологіях, системах машинного слуху і розробці голосових інтерфейсів. Це робить його незамінним інструментом для вчених та інженерів, які працюють з акустичними системами.

Робота (Salmon, Verron, Camier & Malgrange, 2024) присвячена адаптації Pyroomacoustics

для задач ауралізації, включно з моделюванням реверберації та акустичних характеристик приміщень. У дослідженні оцінюються точність симуляцій та їхня відповідність реальним умовам, що підтверджує надійність пакета для аудіовізуалізації. Результати демонструють перспективність використання Pyroomacoustics для проєктування і тестування аудіосистем, а також для досліджень сприйняття звуку.

Дослідження імпульсних характеристик приміщень за допомогою пакета gruRIR, описані в роботі (С. Othmani et al., 2024). gruRIR – це бібліотека на Python, призначена для прискореного моделювання імпульсних характеристик приміщень з використанням графічних процесорів (GPU). Вона забезпечує високу продуктивність за рахунок паралельних обчислень, що робить її ефективною для обробки складних акустичних сценаріїв. Бібліотека підтримує гнучкість налаштування параметрів симуляції, включно з геометрією кімнат і акустичними властивостями матеріалів. Завдяки своїй швидкості та масштабованості, gruRIR знаходить застосування в дослідженнях і проєктуванні аудіосистем, а також при розробці технологій віртуальної реальності.

Чимала кількість наукових робіт присвячена дослідженням у галузі моделювання імпульсних характеристик приміщень. Так, у роботі (Sanguano et al., 2023) розглядаються передові підходи до виявлення часу прольоту в імпульсних характеристиках приміщень, з акцентом на точність і надійність методів. У статті описується методологія генерації імпульсних характеристик у реальному часі з використанням машинного навчання, застосовна до акустичних віртуальних середовищ.

Дослідження, описане в (Vairetti et al., 2017), пропонує масштабований алгоритм апроксимації імпульсних характеристик з фізичною мотивацією на основі ортонормальних базисних функцій.

У матеріалах (Zhao et al., 2024) описується база даних імпульсних характеристик для відтворення звукового поля в декількох зонах, включно з результатами моделювання.

Важливим елементом аналізу звукових параметрів є просторова локалізація звуку. В роботі (Zahynailo, Prihodchenko, 2024) аналізуються різні підходи до локалізації джерел звуку, зокрема методи оцінки часу затримки сигналу (Time Delay Estimation) і формування променя (Beamforming). Особлива увага приділяється використанню мікрофонних масивів, які є ключовим інструментом для реалізації цих методів акустичної локації. Детально розглядається

алгоритм визначення локації на основі часової затримки, включаючи основні математичні вирази для представлення сигналу відносно кожного мікрофона, а також формули для обчислення крос-кореляції та узагальненої крос-кореляції. Описуються виклики, пов'язані з локалізацією у середовищах із високим рівнем шуму (низьким SNR), і пропонуються можливі шляхи їх розв'язання. Також представлено детальний аналіз методу формування променя, включаючи теоретичні основи та процес його реалізації.

Відтак, моделювання імпульсних характеристик приміщень (RIR) є ключовою галуззю досліджень у науці про дані та комп'ютерних технологіях, оскільки воно лежить в основі розвитку сучасних аудіосистем і технологій віртуальної реальності. Воно дає змогу не тільки поліпшити якість звукового відтворення, а й створити більш реалістичні та адаптивні середовища для користувачів. Дослідження у цій галузі є критично важливими для розроблення алгоритмів обробки звуку, машинного навчання та сенсорних технологій, що вимагають високої точності та продуктивності.

Тим не менш, здебільшого у вищезазначених та інших роботах увага акцентується на методах обробки, в яких задіяні окремі обчислювальні станції. Паралелізація процесів обчислення та моделювання акустичних середовищ у повній мірі не представлена, що робить її перспективним напрямком досліджень.

Матеріали та методи. Комп'ютерна система, розроблена для моделювання звуку в замкнених приміщеннях, характеризується компонентною структурою, орієнтованою на модульність, масштабованість і чіткий розподіл функціональності між її складовими, що дозволяє ефективно моделювати процеси поширення звуку, адаптуючись до різних сценаріїв та апаратних платформ. Центральним елементом розробленого програмного забезпечення є обчислювальний модуль, який виконує чисельні розрахунки динаміки звукових хвиль. Його функціональність включає дискретизацію геометрії середовища, моделювання часової еволюції, врахування крайових умов, реалізацію алгоритмів методів скінченних елементів і граничних елементів. Як видно з UML-діаграми компонентів, наведеної на рис. 1, цей модуль є ядром системи, і, у свою чергу, використовує підсистеми для інтеграції просторових і часових параметрів, оптимізації обчислень і розподілу ресурсів. Така структура забезпечує баланс між продуктивністю й точністю, через що система виявляється надійним інструментом для складних технічних симуляцій.

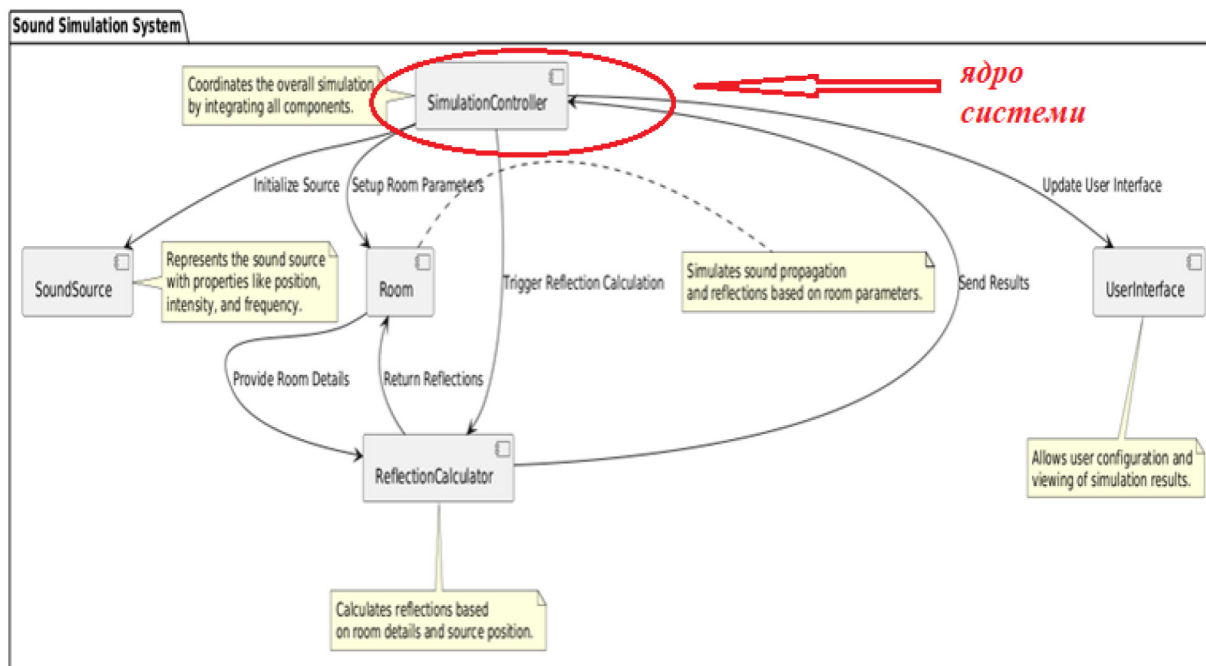


Рис. 1. Діаграма компонентів UML для розробленої інформаційної системи

Наведені нижче результати обчислювальних експериментів свідчать про те, що розроблене програмне забезпечення є потужним інструментом для дослідників і дозволяє вивчати складні акустичні явища з високим рівнем деталізації.

Результати проведених експериментів. Система стартує з модуля управління параметрами, який служить точкою взаємодії користувача із програмним забезпеченням. Користувач вводить початкові дані. Вони включають параметри середовища, в якому поширюватимуться звукові хвилі – характеристики приміщення: форму і розміри кімнати, коефіцієнти поглинання для кожної стіни та властивості повітря;

властивості джерела звуку, такі як інтенсивність, частота, розташування у просторі тощо (рис. 2). Цей модуль перетворює вхідні дані у формат, зрозумілий іншим компонентам системи, і передає їх до обчислювального модуля.

На наступному етапі відбувається чисельне моделювання звукових хвиль, яке виконує обчислювальний модуль. У його основі лежать диференційні рівняння, що описують хвильовий процес у конкретному середовищі. Для їх розв'язання використовуються методи скінченних різниць або інші чисельні техніки, які забезпечують необхідну точність і швидкодію. У процесі обчислень система визначає, як звук

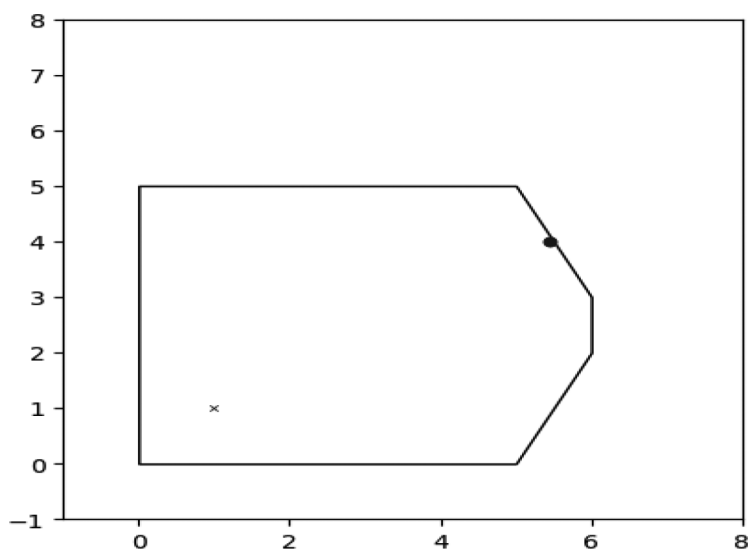


Рис. 2. Схема змодельованої кімнати з одним джерелом звуку (точка) та одним мікрофоном (хрестик)

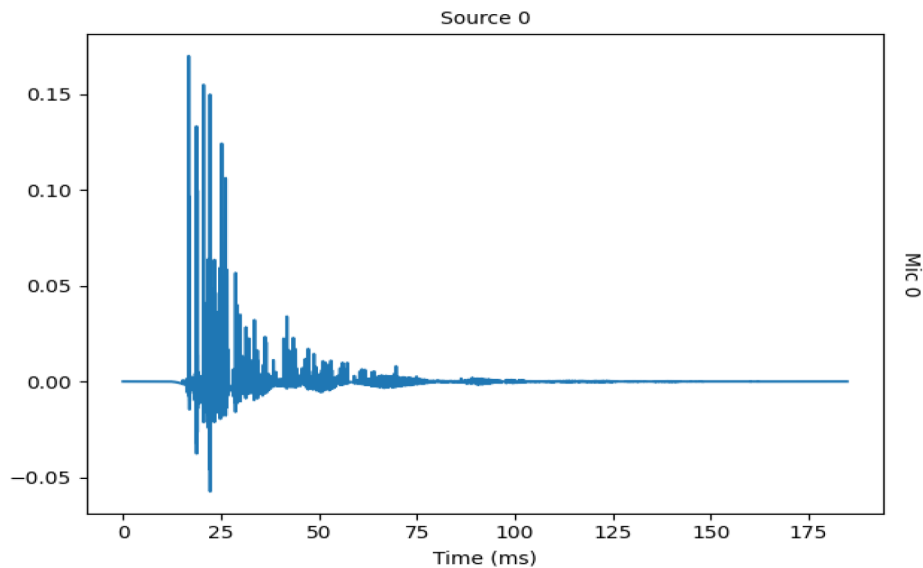
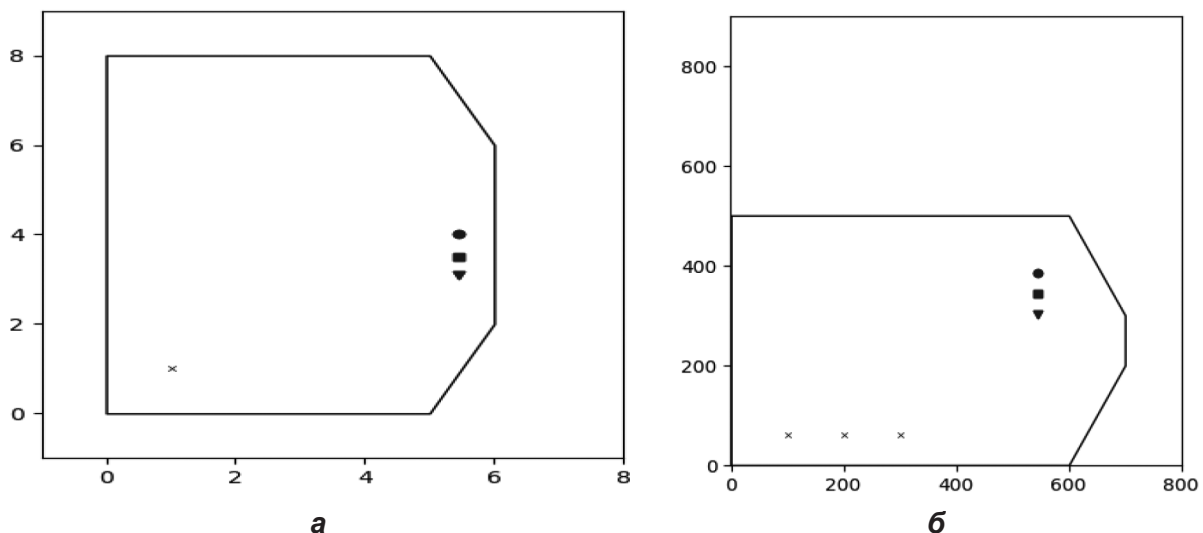


Рис. 3. Змодельована характеристика прийому імпульсу звуку в кімнаті



**Рис. 4. Змодельовані карти кімнат із розташуванням джерел звуку та мікрофонів:
а – один мікрофон і три джерела звуку; б – три мікрофони і три джерела звуку**

поширюється від джерела (рис. 3), відбивається від стін і поступово загасає в залежності від заданих характеристик. Розроблена система дозволяє будувати будь-які замкнені простори, в які можливо додавати необмежену кількість джерел звуку та мікрофонів (рис. 4). Цей модуль реалізовано як оптимізовану обчислювальну структуру, що працює у кілька потоків, щоб зменшити час обробки складних сценаріїв.

Модуль контролю виконання координує всі процеси в системі (рис. 1). Він забезпечує послідовність обчислень, моніторинг проміжних результатів і перевірку стабільності симуляції. У разі виявлення невідповідностей чи помилок цей модуль ініціює коригувальні дії або інформує користувача про необхідність зміни параметрів. Це дозволяє забезпечити надійну роботу

програмного забезпечення навіть у складних симуляційних умовах.

Зазначимо, що результати моделювання прийому звуку на мікрофони, віддалені один від одного, виявилися прогнозованими, а саме – різниця у моментах часу фіксування звукових хвиль, в залежності від відстані (рис. 5). А, отже, за допомогою створеного програмного забезпечення можна проводити модельні експерименти без створення фізичних макетів, що значно спрощує задачу оптимізації локалізації джерела звуку в просторі.

На рис 6 представлена взаємодія масиву з трьох мікрофонів з одним із трьох джерел звуку, розміщених у кімнаті (рис. 4, б). На графіках чітко видно, що в результаті моделювання одного звукового імпульсу мікрофони

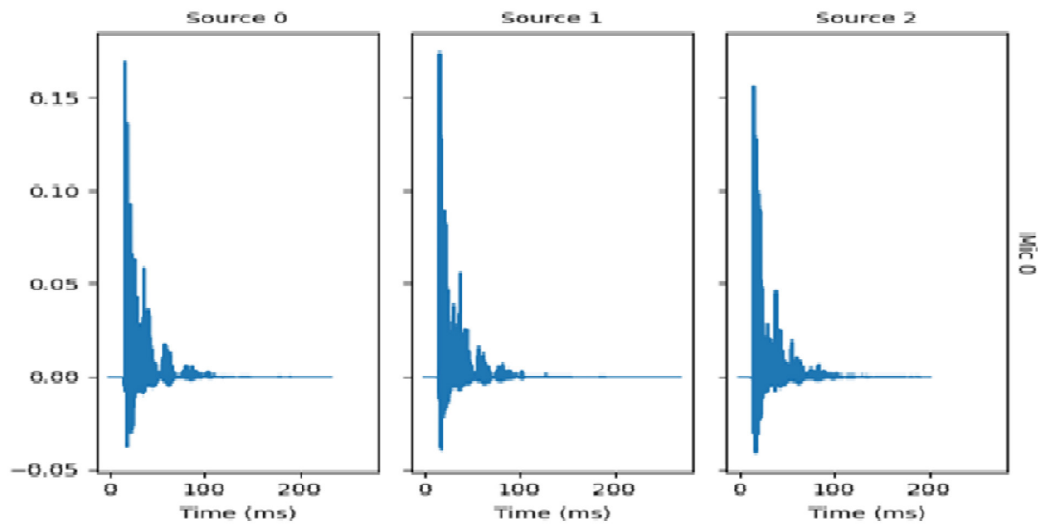


Рис. 5. Прийом звуку одним мікрофоном трьох джерел звуку

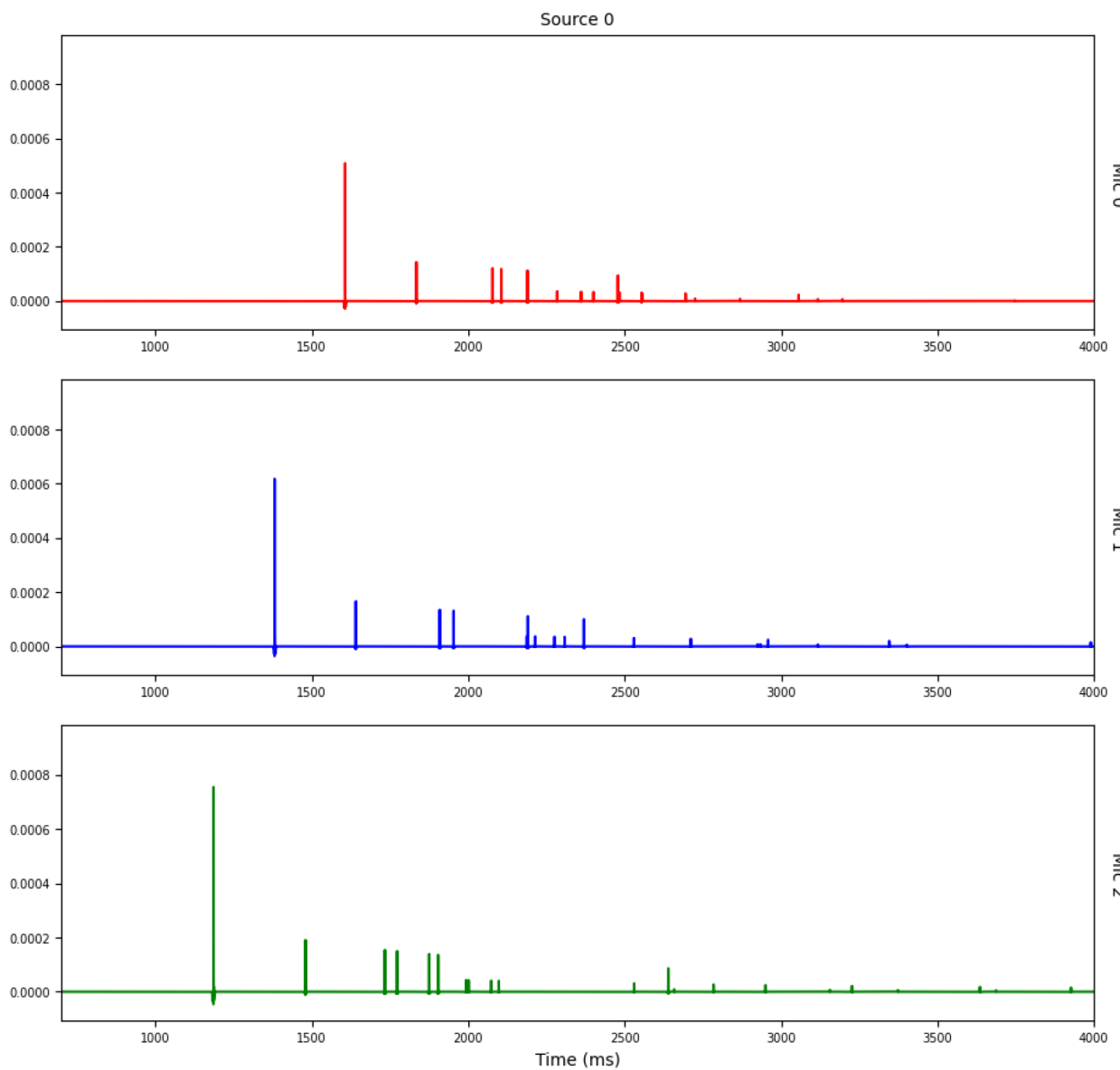


Рис. 6. Прийом звуку трьома мікрофонами від одного з трьох джерел звуку.
Перший мікрофон – найвіддалений

приймають цей імпульс тим швидше та з більшою амплітудою, чим коротша відстань від джерела до мікрофону, що повністю відповідає процесу поширення звукових коливань. Додаткові серії імпульсів, що зафіксовані мікрофонами – відлуння від стін кімнати, що також коректно відтворює фізику процесу. Із іншими джерелами звуку ситуація аналогічна, різниця лише у часі і розмірі імпульсів, в залежності від відстані.

Слід зазначити, що розроблена система включає також модуль візуалізації. Цей модуль перетворює чисельні дані на графічні зображення, які демонструють поширення звукових хвиль у просторі в різні моменти часу. Візуалізація представлена у вигляді динамічних 2D-діаграм, що дозволяє спостерігати процес відбиття, інтерференції та загасання звукових хвиль. Завдяки цьому користувач отримує наочну картину, яка дозволяє краще зрозуміти вплив акустичних властивостей середовища на поведінку звуку.

Система підтримує інтерактивний інтерфейс, що дозволяє користувачеві змінювати параметри симуляції у реальному часі та спостерігати за впливом цих змін на результати. Це є особливо корисним для дослідників, котрим

необхідно перевірити різні гіпотези або оптимізувати акустичні характеристики середовища.

Висновки. Розроблене програмне забезпечення для симуляції звукових хвиль забезпечує високу точність моделювання, аналіз та візуалізацію процесів поширення звукових хвиль у відкритих та замкнених середовищах. Робота системи характеризується тісною взаємодією ключових функціональних модулів, що гарантує стабільність і надійність функціонування, адаптивність системи до різних типів завдань і середовищ моделювання. Результати наведених та багатьох інших експериментів демонструють можливість за допомогою створеного інструменту аналізувати та оптимізувати акустичні середовища, моделювати ситуації, які у реальності малоймовірно відтворити. Напрямок подальших досліджень є удосконалення паралельних програмних засобів задля підвищення ефективності розпізнавання джерел акустичного сигналу.

Роботу виконано в рамках держбюджетної теми «Високопродуктивні багатопроекторні системи: особливості конструювання, дослідження оцінок ефективності, застосування до розв'язування прикладних задач» (державний реєстраційний номер 0122U201569).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Scheibler R., Bezzam E., Dokmanic I. Pyroomacoustics: A Python Package for Audio Room Simulation and Array Processing Algorithms. (2017). <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8461310>
2. Salmon F., Verron Ch., Camier C., Malgrange M. Adaptation and evaluation of Pyroomacoustics for auralization purposes. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. 2024. 270. 5906–5917. https://doi.org/10.3397/IN_2024_3660
3. C. Othmani et al. A review of the state-of-the-art approaches in detecting time-of-flight in room impulse responses, *Sensors and Actuators: A. Physical*, 2024. vol. 374, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115467>
4. Sanguano D., Lucio Naranjo J., Tenenbaum R., Sampaio-Regattieri G. B. Real-time impulse response: a methodology based on Machine Learning approaches for a rapid impulse response generation for real-time Acoustic Virtual Reality systems. *Intelligent Systems with Applications*. 2023. 21. 200306. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2023.200306>
5. Vairetti G., De Sena E., Catrysse M., Jensen S. H., Moonen M., van Waterschoot T. A Scalable Algorithm for Physically Motivated and Sparse Approximation of Room Impulse Responses With Orthonormal Basis Functions. in *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2017. vol. 25, no. 7, pp. 1547–1561, July 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/TASLP.2017.2700940>
6. Zhao S., Zhu Q., Cheng E., Burnett I. S. Erratum: A room impulse response database for multizone sound field reproduction (L) [*J. Acoust. Soc. Am.* 152(4), 2505–2512 (2022)]. 2024. *J. Acoust. Soc. Am.*, 155, 2170.
7. Zahynailo Ye., Prihodchenko S. Development of localization tools and consideration of basic acoustic localization methods. *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION*. 2024. 160–164. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-20>
8. Prykhodchenko S., Koriashkina L., Shevtsova O., Zahynailo Ye. Conceptual model of the software architecture for processing multisource acoustic signals. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2024. № 4.

REFERENCES:

1. Scheibler, R., Bezzam, E. & Dokmanic, I. (2017). Pyroomacoustics: A Python Package for Audio Room Simulation and Array Processing Algorithms. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8461310>

2. Salmon, F., Verron, Ch., Camier, C., & Malgrange, M. (2024). Adaptation and evaluation of Pyroomacoustics for auralization purposes. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. 270. 5906–5917. https://doi.org/10.3397/IN_2024_3660
3. C.Othmani et al., (2024). A review of the state-of-the-art approaches in detecting time-of-flight in room impulse responses, *Sensors and Actuators: A. Physical*, vol. 374, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115467>
4. Sanguano, D., Lucio Naranjo, J., Tenenbaum, R., & Sampaio-Regattiere, G.B. (2023). Real-time impulse response: a methodology based on Machine Learning approaches for a rapid impulse response generation for real-time Acoustic Virtual Reality systems. *Intelligent Systems with Applications*. 21. 200306. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2023.200306>
5. Vairetti, G., De Sena, E., Catrysse, M., Jensen, S. H., Moonen M. & van Waterschoot, T. (2017). A Scalable Algorithm for Physically Motivated and Sparse Approximation of Room Impulse Responses With Orthonormal Basis Functions. in *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 25, no. 7, pp. 1547–1561, July 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/TASLP.2017.2700940>
6. Zhao, S., Zhu, Q., Cheng, E. & Burnett, I. S. (2024). Erratum: A room impulse response database for multizone sound field reproduction (L) [*J. Acoust. Soc. Am.* 152(4), 2505–2512 (2022)]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 155, 2170.
7. Zahynailo, Ye & Prihodchenko, S. (2024). Development of localization tools and consideration of basic acoustic localization methods. *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION*. 160–164. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-20>
8. Prykhodchenko S., Koriashkina L., Shevtsova O., Zahynailo Ye. (2024). Conceptual model of the software architecture for processing multisource acoustic signals. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. № 4.