

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Метод визначення відстані до джерела звуку
в системі управління елементами розумного будинку
(тема)

Виконав:
студент II курсу, групи КСМм-23-1
Курлаєв В.І.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерні системи та мережі
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Барковська О.Ю.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

Коваленко А.А.
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 123 «Комп'ютерна інженерія» _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Комп'ютерні системи та мережі _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Курлаєву Вадиму Івановичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Метод визначення відстані до джерела звуку в системі управління елементами розумного будинку

затверджена наказом по університету від “ 22 ” листопада 2024 р. № 1237 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 20 січня 2025 р.

3. Вхідні дані до роботи _____

Всеспрямований мікрофонний модуль INMP441 I2C;

Програмований цифровий сигнальний процесор ADAU1401 DSP;

Мікроконтролерна плата Arduino Uno R2.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

Огляд методів визначення відстані до джерела звуку

Вибір інструментальних засобів

Вибір та обґрунтування методики дослідження

Розробка структурної схеми системи визначення відстані до джерела звуку

Проведення експериментів

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) 15 слайдів

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)


Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд методів визначення відстані до джерела звуку	26.11.24-30.11.24	
2	Вибір інструментальних засобів	02.12.24-05.12.24	
3	Вибір та обґрунтування методики дослідження	06.12.24-10.12.24	
4	Розробка структурної схеми системи визначення відстані до джерела звуку	11.12.24-21.12.24	
5	Проведення експериментів	23.12.24-03.01.25	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	04.01.25-07.01.25	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	08.01.25-11.01.25	
8	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	13.01.25-17.01.25	

Дата видачі завдання 25 листопада 2024 р.

Студент 
(підпис)

Керівник роботи 
(підпис)

доц.Барковська О.Ю.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 76 с., 18 рис., 11 табл., 1 дод., 18 джерел.

СИСТЕМА, ЗВУК, ВІДСТАНЬ, МЕТОДИ, МІКРОФОН, DSP, SIM, TDoA, ToA, ТОЧНІСТЬ.

Метою роботи є розробка ефективної системи визначення відстані до джерела звуку для автоматизації процесів у "розумному будинку". Застосування таких систем дозволяє підвищити комфорт, енергоефективність та безпеку житлових і комерційних приміщень.

У ході виконання кваліфікаційної роботи отримано результати, які підтвердили, що метод sound intensity method демонструє стабільні результати у складних акустичних середовищах, тоді як метод TDoA є чутливим до рівня шуму.

Похибка для кожного методу була оцінена у відсотках, що дозволило виявити їхню залежність від рівня шуму та складності акустичного середовища. Найменші похибки зафіксовані для ToA за низького рівня шуму, а найбільші – для TDoA у складних умовах.

Запропоновано використання комбінованого підходу (поєднання ToA та SIM) для досягнення найкращих результатів у реальних умовах.

ABSTRACT

Master's thesis: 76 pages, 18 figures, 11 tables, 1 appendices, 18 sources.

SYSTEM, SOUND, DISTANCE, METHODS, MICROPHONE, DSP, SIM, TDoA, ToA, ACCURACY.

The purpose of the study is to develop an effective system for determining the distance to a sound source to automate processes in a "smart home." The implementation of such systems allows for improved comfort, energy efficiency, and safety in residential and commercial premises.

During the completion of the qualification work, the results confirmed that the sound intensity method (SIM) demonstrates stable performance in complex acoustic environments, while the TDoA method is sensitive to noise levels.

The error rate for each method was evaluated as a percentage, which revealed their dependence on noise levels and the complexity of the acoustic environment. The lowest errors were recorded for ToA under low noise conditions, while the highest errors were observed for TDoA in challenging conditions.

A combined approach (combining ToA and SIM) was proposed to achieve the best results in real-world scenarios.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП	8
1 ОГЛЯД ПРОБЛЕМНОЇ ОБЛАСТІ	9
1.1 Обґрунтування актуальності теми роботи. Концепція розумного будинку.....	9
1.2 Практична значущість методів обробки та аналізу звуку в системах управління елементами розумного будинку.....	13
1.3 Об'єкт та предмет дослідження	19
1.4 Мета та задачі дослідження	20
2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ РОЗУМНИМ БУДИНКОМ	22
2.1 Технології голосового управління в розумних будинках	23
2.2 Фізична природа звуку	27
2.3 Вибір елементної бази пристрою	37
2.4 Бібліотеки для роботи з аналоговими сигналами	45
3 ОПИС МЕТОДОЛОГІЇ РІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ	49
3.1 Виконання експерименту у контрольованих умовах	50
3.2 Виконання експерименту з відтворення шуму з різними рівнями дБ.....	52
3.3 Дослідження в умовах реверберації.....	55
ВИСНОВКИ.....	65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	66
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	68

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

AoA – кут прибуття сигналу (англ., Angle of Arrival)

DSP – цифровий сигнальний процесор (англ., Digital Signal Processor)

ESP – екстрасенсорне проектування або платформа ESP (англ., Espressif Systems Platform, для мікроконтролерів)

SIM – метод звукової інтенсивності (англ., Sound Intensity Method)

TDoA – різниця часу прибуття (англ., Time Difference of Arrival)

ToA – час прибуття сигналу (англ., Time of Arrival)

USB – універсальна послідовна шина (англ., Universal Serial Bus)

ВСТУП

Сучасний розвиток технологій автоматизації призвів до появи інноваційних рішень для повсякденного життя, серед яких важливе місце займає концепція "розумного будинку". Такі системи забезпечують автоматизоване управління електронними пристроями та інженерними комунікаціями, що дозволяє підвищити комфорт, безпеку та енергоефективність житла. Одним із найбільш зручних та інтуїтивних методів управління вважається голосове керування, оскільки воно забезпечує просту і швидку взаємодію користувача з системою без необхідності фізичних маніпуляцій. Однак, для повноцінного та ефективного функціонування системи "розумного будинку" з голосовим управлінням важливо забезпечити здатність визначати місцезнаходження користувача для автоматичного керування пристроями відповідно до його позиції у приміщенні.

Голосові команди, що надходять із різних частин будинку, повинні коректно розпізнаватись, а пристрої, до яких вони адресовані, активуватись лише в потрібній зоні. Це особливо важливо в умовах багатокімнатних приміщень або великих просторів, де точне позиціонування користувача дозволяє уникнути помилкової активації або, навпаки, недостатньої реакції системи. Відтак, розробка методів для точного визначення місця розташування джерела звуку, таких як Time of Arrival (ToA) та Time Difference of Arrival (TDoA), стає актуальною науковою і практичною задачею для підвищення точності та адаптивності голосового управління у "розумних будинках".

1 ОГЛЯД ПРОБЛЕМНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Обґрунтування актуальності теми роботи. Концепція розумного будинку

В умовах швидкого розвитку технологій автоматизації, концепція "розумного будинку" стає все більш затребуваною як серед приватних користувачів, так і у комерційному секторі. "Розумний будинок" – це інтегрована система, що дозволяє автоматизувати та централізовано керувати різними побутовими пристроями й інженерними комунікаціями (освітленням, системами клімат-контролю, безпеки та мультимедіа) для підвищення зручності, енергоефективності та безпеки житлових і робочих приміщень. Одним із найінтуїтивніших способів взаємодії з такими системами є голосове управління, яке спрощує контроль над пристроями, дозволяючи користувачам не вдаватися до фізичних маніпуляцій. Це актуалізує необхідність розвитку технологій точного позиціонування голосових команд для ефективного функціонування системи "розумного будинку" у реальних умовах.

Елементи управління розумним будинком – це різноманітні пристрої та технології, які забезпечують автоматизований контроль і керування системами та приладами в будинку. Вони працюють як інтерфейс між користувачем і "розумними" пристроями, дозволяючи налаштовувати їх роботу відповідно до індивідуальних потреб та умов. Такі елементи роблять будинок адаптивним і зручним для життя, забезпечуючи комфорт, енергоефективність, безпеку та доступність.

Елементи розумного будинку поділяються на різні типи залежно від їхньої функції (рисунок 1.1). До основних елементів належить система освітлення, яка включає розумні лампи, світильники та вимикачі, що дозволяють автоматично або дистанційно регулювати освітлення відповідно

до потреб користувачів. Клімат-контроль також є важливим компонентом і включає розумні термостати, кондиціонери та обігрівачі, які автоматично підтримують комфортний мікроклімат, регулюючи температуру та вологість у приміщенні. Системи безпеки й моніторингу, до яких входять розумні замки, відеокамери, сигналізація, датчики руху та розбиття скла, забезпечують контроль доступу та моніторинг у реальному часі для підвищення безпеки будинку.



Рисунок 1.1 – Узагальнене представлення підсистем системи Розумний будинок

Датчики та сенсори є іншим важливим елементом розумного будинку, які фіксують параметри довкілля, такі як температура, вологість, якість

повітря, витік води чи газу, і забезпечують контроль за умовами в будинку, автоматично активуючи інші пристрої в разі потреби. Аудіо- та мультимедійні системи, що включають розумні телевізори, колонки, аудіосистеми, інтегруються з іншими елементами для створення повноцінного мультимедійного середовища. Розумні розетки та вимикачі дозволяють дистанційно керувати живленням підключених пристроїв, що сприяє енергоефективності й автоматизації. Спеціалізовані системи зрошення та вологості також є частиною розумного будинку та використовуються для автоматизації поливу рослин і контролю вологості ґрунту, що особливо корисно в садах та теплицях.

Для керування елементами розумного будинку існує кілька способів, кожен з яких забезпечує зручність і адаптивність відповідно до потреб користувачів (Рисунок 1.2). Один із найпоширеніших способів – це мобільні додатки, що дозволяють дистанційно керувати всіма елементами будинку через смартфон або планшет, створювати графіки роботи пристроїв та отримувати сповіщення про стан систем. Голосові асистенти, такі як Alexa, Google Assistant, Siri, забезпечують інтуїтивне керування пристроями за допомогою голосових команд, що робить управління простим і доступним. Сенсорні панелі управління розташовуються в ключових зонах будинку й дозволяють централізовано керувати всіма підключеними системами.

Автоматичні сценарії та тригери є ще одним ефективним способом, що дозволяє пристроям працювати без втручання користувача, коли вони автоматично взаємодіють між собою залежно від подій, наприклад, датчик руху вмикає світло при вході в кімнату. Деякі системи пропонують веб-інтерфейси, що дозволяє керувати розумним будинком через інтернет-браузер із комп'ютера. Крім того, деякі елементи розумного будинку підтримують керування за допомогою дистанційних пультів, які забезпечують традиційний спосіб взаємодії, особливо для аудіосистем і освітлення. Деякі пристрої також підтримують управління жестами або фізичними кнопками, що дозволяє, наприклад, вмикати або вимикати світло

дотиком або відкривати штори жестами. Ці методи управління підвищують зручність, безпеку та адаптивність, дозволяючи користувачам обирати найзручніший спосіб взаємодії залежно від ситуації й особистих уподобань.

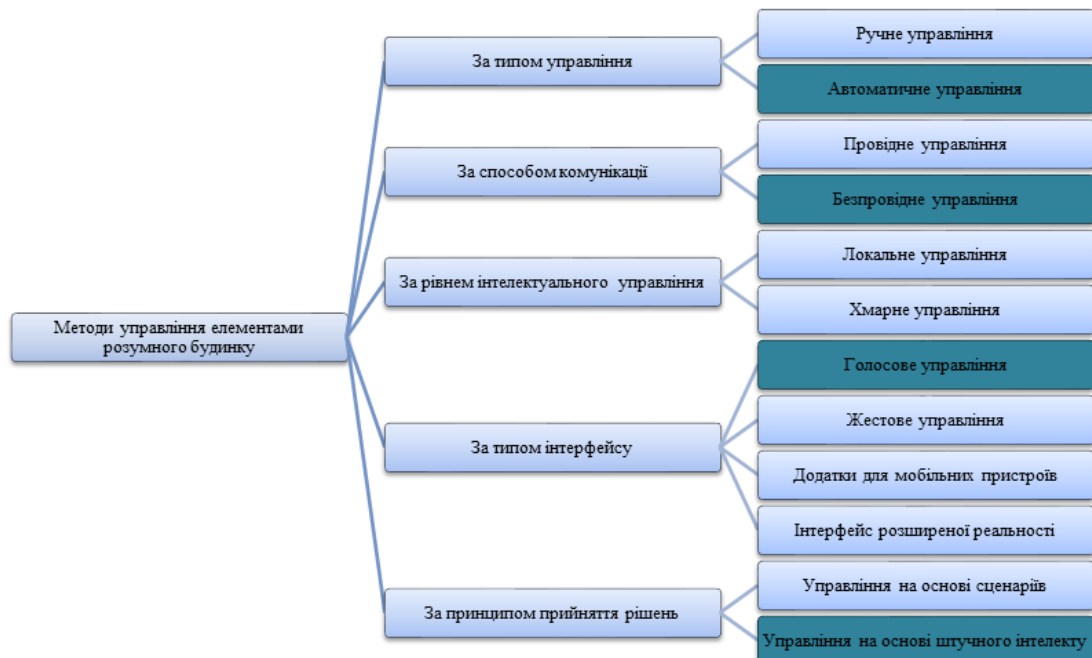


Рисунок 1.2 – Управління елементами Розумного будинку

Особливу увагу слід приділити ролі платформи Arduino Uno у реалізації таких систем, оскільки це доступне й просте у використанні рішення для створення недорогих прототипів "розумного будинку". Arduino Uno забезпечує можливості для інтеграції різних сенсорів і виконавчих пристроїв, а також для програмування базових алгоритмів голосового управління. Завдяки широкій підтримці середовища програмування та сумісності з великою кількістю додаткових компонентів, таких як мікрофони, модулі реле та Wi-Fi, платформа Arduino Uno ідеально підходить для впровадження прототипів домашньої автоматизації з базовими функціями голосового керування.

Проте, при реалізації голосових команд у "розумному будинку" постає ряд важливих технічних викликів. Ключовим є забезпечення коректного

позиціювання джерела звуку та активації відповідних пристроїв у конкретній зоні будинку. Це особливо актуально у багатокімнатних приміщеннях або великих просторах, де точне визначення місцезнаходження користувача дозволяє уникнути помилкової активації або недостатньої реакції системи. Голосові команди, що надходять із різних частин будинку, повинні правильно розпізнаватися, а активовані пристрої мають чітко відповідати розташуванню користувача. Тому розробка методів для точного визначення місця розташування джерела звуку стає однією з ключових вимог до ефективної системи голосового управління в "розумному будинку".

1.2 Практична значущість методів обробки та аналізу звуку в системах управління елементами розумного будинку

Практична значущість методів обробки та аналізу звуку в системах управління "розумного будинку" полягає в їхній здатності підвищити точність, надійність та адаптивність голосового управління, роблячи взаємодію з домашніми пристроями інтуїтивною та зручною. Голосове управління є одним із найбільш природних способів комунікації, який дозволяє користувачам здійснювати контроль над освітленням, кліматом, безпекою та іншими функціями без використання фізичних пультів або додатків. Однак, ефективне голосове управління потребує точної обробки сигналів, що вимагає застосування спеціалізованих методів аналізу звуку для забезпечення швидкої та коректної реакції системи на команди користувача.

Голосове управління та визначення відстані до джерела звуку мають значні переваги порівняно з іншими методами управління в "розумному будинку", такими як сенсорні панелі, дистанційні пульти або мобільні додатки, оскільки вони забезпечують природну і зручну взаємодію з системою, роблячи її більш інтуїтивною і доступною. Голосове управління дозволяє користувачам взаємодіяти з системою лише за допомогою голосових команд, що набагато зручніше, ніж шукати фізичний пристрій або

мобільний додаток. Це особливо корисно, коли руки зайняті або користувач знаходиться далеко від панелі управління, оскільки голосові команди виконуються миттєво і не потребують додаткових дій. Такий спосіб також є ефективним для людей з обмеженою мобільністю.

Завдяки визначенню відстані до джерела звуку система "розумного будинку" точно розпізнає, з якої зони надійшла команда, і активує пристрої саме в цьому місці. Це особливо важливо у багатокімнатних будинках, де користувачі можуть переміщуватися, а система повинна адаптуватися до їхнього місцезнаходження, наприклад, вмикаючи світло або змінюючи температурний режим в потрібній зоні. Голосове управління інтегрується з рутинними діями та автоматичними сценаріями, що дозволяє системі розумного будинку виконувати щоденні завдання автоматично. Так, користувач може налаштувати зміну освітлення або температури залежно від часу доби, а визначення відстані до джерела звуку дозволяє системі виконувати ці дії тільки в тих кімнатах, де перебуває користувач.

Цей метод робить "розумний будинок" доступнішим для людей з обмеженими фізичними можливостями, оскільки не вимагає натискання кнопок або переміщення по будинку. Це важливо для людей із порушеннями зору або рухової активності, які можуть просто озвучити команду, а система виконає необхідні дії в потрібній зоні. Визначення відстані до джерела звуку дозволяє системі активувати пристрої лише там, де перебуває користувач, і вимикати непотрібні прилади в інших зонах, що знижує енергоспоживання, зменшує витрати та робить будинок екологічнішим. Наприклад, світло вмикається лише в кімнаті, де знаходиться користувач, і автоматично вимикається, коли він залишає цю зону.

Голосове управління можна інтегрувати з системами безпеки, що дозволяє користувачеві подати тривожну команду в разі надзвичайної ситуації, такої як витік газу або вторгнення, навіть якщо він не може дістатися до сенсорної панелі (рисунок 1.3.). Серед прикладів систем голосового управління в системах Розумного будинку можна виділити Philips

Hue – голосове управління освітленням у поєднанні з Google Assistant, Alexa або Siri. Користувачі можуть змінювати яскравість, колір світла та інші параметри за допомогою голосу; Nest Thermostat - підтримує голосове управління температурою в будинку через Google Assistant або Amazon Alexa; Samsung SmartThings – система для управління різними IoT-пристроями у будинку, яка інтегрується з голосовими асистентами для контролю всього – від дверних замків до побутової техніки.

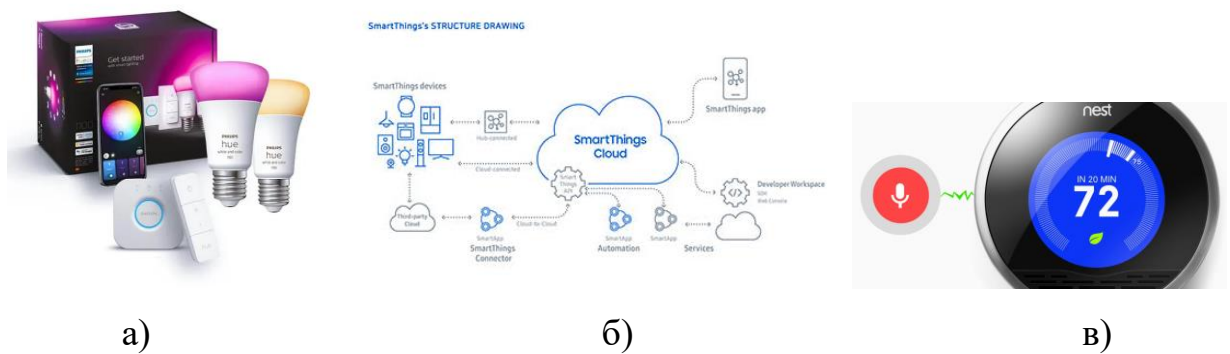


Рисунок 1.3 – Приклади систем голосового управління в системах Розумного будинку

Визначення відстані до джерела звуку також дозволяє точніше реагувати на потенційні загрози, відстежуючи звуки у віддалених кімнатах або поза полем зору користувача. Наприклад, у разі незвичного шуму або потенційної загрози (такої як звук розбитого скла чи дзвінок у двері) система може визначити, де саме виник звук, і вчасно попередити користувача або надіслати сповіщення на його пристрій. Така реакція на основі звукового позиціонування допомагає не лише контролювати ситуацію в будинку, а й створює відчуття захищеності. Завдяки цим перевагам голосове управління та визначення відстані до джерела звуку є цінними інструментами для покращення комфорту, безпеки та енергоефективності в "розумних будинках", забезпечуючи зручний, інтуїтивний та адаптивний спосіб управління для користувачів.

Акустична оптимізація за допомогою визначення відстані до джерела звуку є підходом, який дозволяє налаштовувати звукові системи і пристрої у "розумному будинку" для досягнення максимально комфортного та якісного звуку залежно від місцезнаходження користувача. Це стає особливо корисним у таких просторах, як вітальні, домашні кінотеатри, конференц-зали та робочі приміщення, де важливо створити оптимальне звукове середовище.

Визначення відстані до джерела звуку дозволяє системі автоматично адаптувати параметри акустичних пристроїв, таких як динаміки або мікрофони, до просторових умов приміщення і положення користувача. Якщо система знає, де перебуває користувач, вона може регулювати гучність, баланс та спрямованість звуку так, щоб досягти рівномірного звучання у всьому просторі. Наприклад, у великій кімнаті або приміщенні зі складною акустиккою система може посилити звук в одній зоні або зменшити в іншій, щоб уникнути реверберації та забезпечити чисте звучання.

Акустична оптимізація також дозволяє налаштовувати затримку звуку для досягнення синхронності між різними динаміками. Визначаючи відстань між динаміками і слухачем, система може коригувати час подачі звукових сигналів так, щоб вони одночасно досягали вух користувача, створюючи більш природний і об'ємний звук. Це особливо важливо для мультимедійних систем у домашніх кінотеатрах, де звук має бути максимально синхронізованим з зображенням.

Крім того, система, що розуміє відстань до джерела звуку, може регулювати гучність для окремих користувачів або зон у будинку. Наприклад, у конференц-залі мікрофони можуть автоматично налаштовувати рівень підсилення звуку залежно від того, наскільки далеко від них знаходиться спікер. Це дозволяє підтримувати стабільний рівень гучності і чіткості мови для всіх учасників, незалежно від їхнього місцезнаходження.

На ігрових консолях, таких як PlayStation, Xbox або Nintendo, визначення дистанції до джерела звуку є важливим елементом у створенні

реалістичного об'ємного звукового середовища. Технології, які використовують відстань до джерела звуку, допомагають точно відтворити напрямок і гучність звуків залежно від позиції гравця або подій у грі. Наприклад, якщо персонаж у грі чує кроки, які наближаються з певного напрямку, звукова система консолі регулює гучність і тональність, створюючи відчуття, що кроки справді наближаються, що занурює гравця в ігровий процес. Підприємства

На підприємствах технології визначення відстані до джерела звуку застосовуються для покращення якості конференцій, аудіо та відеозв'язку. Наприклад, у великих конференц-залах мікрофонні системи з функцією автоматичного налаштування гучності визначають, з якої відстані надходить голос спікера, і підлаштовують рівень гучності, щоб забезпечити чіткість звуку для всіх учасників. Крім того, системи з дистанційним визначенням джерела звуку можуть вмикати або вимикати окремі мікрофони в залежності від місця перебування активного учасника, покращуючи загальну якість звуку.

В автомобілях визначення дистанції до джерела звуку використовується для підвищення безпеки та покращення комфорту пасажирів. Системи допомоги водієві, такі як паркувальні сенсори, використовують звук для попередження про відстань до об'єктів. Крім того, технології обробки звуку можуть ідентифікувати джерела зовнішнього шуму, як-от наближення сирени швидкої допомоги, і вказати водієві напрямок джерела звуку. Деякі сучасні аудіосистеми також використовують визначення відстані до пасажирів для регулювання гучності та якості звуку в салоні.

У медицині визначення відстані до джерела звуку допомагає покращити точність діагностики та лікування. У рентгенографії, ультразвукових дослідженнях та томографії технологія визначення відстані дозволяє чітко локалізувати джерело відображених сигналів, допомагаючи лікарям отримувати точні зображення внутрішніх органів. У слухових

апаратах ця технологія допомагає покращити сприйняття звуку: слуховий апарат може визначити, де знаходиться співрозмовник користувача, і відповідним чином налаштувати рівень звуку, підсилюючи лише ті звуки, які йдуть із напрямку розмови.

У діагностичному обладнанні, наприклад, для виявлення витоків газу або пошуку пошкоджень в інженерних конструкціях, використання звукових хвиль дозволяє визначити точне місце пошкодження чи витoku. За допомогою ультразвукових або інфразвукових хвиль, які відбиваються від структурних дефектів, такі системи здатні визначити точне місцезнаходження проблемної ділянки, оцінити її розміри та тип пошкодження. Ця технологія часто використовується для безпечної оцінки стану промислових установок та обладнання.

Під водою визначення відстані до джерела звуку має величезне значення, оскільки радіосигнали не працюють ефективно через високий рівень поглинання водою. У цьому середовищі звук поширюється значно краще, і тому підводні дослідники використовують звукові хвилі для навігації, зв'язку та виявлення об'єктів. Ехолокація та гідролокатори є одними з основних технологій для підводних досліджень і дозволяють точно визначати відстань до об'єктів, таких як рифи, підводні структури або морське дно. Наприклад, кораблі й підводні човни використовують сонари для визначення відстані до інших об'єктів, а також для картографування підводного рельєфу.

У морській біології цей метод застосовується для дослідження руху морських тварин і виявлення їх місцезнаходження. Науковці використовують звукові сигнали, щоб відстежувати тварин, оцінювати їхню відстань та вивчати поведінкові особливості. Крім того, звукова локалізація допомагає при виявленні підводних течій, вимірюванні їхньої швидкості та напрямку, що є важливим для океанографії.

У мобільних телефонах, навушниках і аксесуарах визначення відстані до джерела звуку використовується для поліпшення якості зв'язку,

шумозаглушення та забезпечення об'ємного звучання. Наприклад, у смартфонах із кількома мікрофонами ця технологія дозволяє точно визначати місце розташування звуку, а також виділяти голос користувача, навіть якщо навколо є фоновий шум. Такі функції допомагають підвищити якість дзвінків, покращуючи чіткість розмови та знижуючи рівень перешкод, що є особливо корисним під час гучного оточення.

У бездротових навушниках та гарнітурах з активним шумозаглушенням технологія визначення відстані до джерела звуку дозволяє точно адаптувати рівень звуку залежно від місця розташування голосу співрозмовника, посилюючи звук із потрібного напрямку. Це не тільки покращує якість зв'язку, але й допомагає користувачам краще орієнтуватися в просторі завдяки об'ємному звуку. Також, у портативних колонках із кількома динаміками, деякі моделі використовують відстань до слухача для налаштування спрямованості та гучності звуку, що створює ефект "3D-звучання".

1.3 Об'єкт та предмет дослідження

Об'єктом дослідження є технології "розумного будинку" – системи автоматизації, що дозволяють інтегрувати управління освітленням, кліматом, безпекою та іншими домашніми функціями, зокрема на базі голосового управління. Інтелектуальні системи для дому передбачають широке використання сенсорів та алгоритмів обробки даних для забезпечення зручності та ефективності, підвищення безпеки та енергоефективності в приміщеннях.

Предметом дослідження є методи визначення відстані до джерел звуку, реалізовані на платформі Arduino Uno. У контексті системи "розумного будинку" ця задача має ключове значення для вдосконалення голосового управління, адже точне позиціювання звукових команд дозволяє активувати

лише потрібні пристрої в зоні присутності користувача, що мінімізує ймовірність помилкових або небажаних активацій інших пристроїв.

Визначення відстані до джерела звуку в умовах "розумного будинку" дозволяє адаптувати голосове управління до багатокімнатних просторів або великих приміщень, де користувач може переміщуватися під час взаємодії з системою. Платформа Arduino Uno, на якій базується реалізація, є економічно вигідним і доступним рішенням, що надає базову обчислювальну потужність для роботи з кількома мікрофонами та простими алгоритмами обробки звуку. Це робить Arduino Uno перспективною платформою для побудови прототипів систем розумного будинку та випробування різних методів позиціонування звуку.

Зважаючи на важливість автоматизації та управління домашніми системами, дослідження методів визначення відстані до джерела звуку на платформі Arduino Uno сприятиме розширенню можливостей голосового управління та підвищенню точності виконання команд у "розумному будинку", роблячи систему адаптивною та ефективною в повсякденному використанні.

1.4 Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розробка ефективної системи визначення відстані до джерела звуку для автоматизації процесів у "розумному будинку". Застосування таких систем дозволяє підвищити комфорт, енергоефективність та безпеку житлових і комерційних приміщень.

Для досягнення поставленої мети потрібно буде вирішити кілька завдань:

- дослідити сучасні технології визначення відстані до джерела звуку та проаналізувати їх реалізацію на платформі Arduino Uno;
- розробити математичну модель для визначення відстані до джерела звуку з урахуванням обмежень обчислювальної потужності Arduino Uno;

- створити алгоритм обробки звукових сигналів для визначення часу прибуття (ToA) або різниці часу прибуття (TDoA) сигналу до кількох мікрофонів;
- реалізувати програмне забезпечення для Arduino Uno, яке забезпечить роботу з мікрофонами та обчислення відстані до джерела звуку;
- провести експерименти для оцінки точності та ефективності розробленої системи в умовах "розумного будинку", враховуючи різні відстані та шумові перешкоди.

Запропонована система дозволить визначати положення користувача та активувати відповідні пристрої залежно від його місцезнаходження, що сприятиме підвищенню комфорту та зручності автоматизованого управління домашніми пристроями.

Шляхи подальшого розвитку дослідження включають розширення функціоналу системи за допомогою потужніших мікроконтролерів, таких як ESP32, що дозволить збільшити кількість мікрофонів для покращення точності позиціонування та обробки звукових сигналів у реальному часі. Крім того, подальший розвиток може передбачати інтеграцію з додатковими сенсорами, що підвищить стійкість системи до шуму, а також впровадження алгоритмів машинного навчання для адаптації до змін навколишнього середовища.

Реалізації базової AoA-системи, що складається з двох мікрофонів. Цей метод може застосовуватися в малих кімнатах для приблизного визначення напрямку джерела звуку, але не підходить для великих просторів, оскільки точність значно знижується зі збільшенням відстані.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ РОЗУМНИМ БУДИНКОМ

Розвиток технологій управління "розумним будинком" значно прискорився за останні роки, завдяки інтеграції різних пристроїв у єдину систему автоматизації. Огляд існуючих аналогів дозволяє оцінити сучасні підходи, методи та технології, які застосовуються для контролю і керування пристроями в будинку. В сучасних системах "розумного будинку" найчастіше використовуються такі рішення, як хмарні платформи, локальні пристрої управління на базі мікроконтролерів, гібридні системи, а також спеціалізовані голосові помічники.

Таблиця 2.1 – Порівняльна таблиця сучасних рішень для управління розумним будинком

Система управління	Основні характеристик и	Переваги	Недоліки	Приклади використання
1	2	3	4	5
Хмарні платформи	Управління через хмарний сервіс, висока функціональність	Простота, підтримка багатьох пристроїв	Залежність від Інтернету, питання приватності	Google Home, Amazon Alexa, Apple HomeKit
Локальні системи на мікроконтролерах	Локальне управління без Інтернету, прості команди	Приватність, відсутність залежності від Інтернету	Обмежена функціональність, складність налаштування	Arduino, ESP32, Raspberry Pi

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5
Гібридні системи	Поєднання хмарних і локальних рішень	Гнучкість, локальне виконання важливих команд	Складність інтеграції	Home Assistant
Голосові помічники	Голосове управління через хмару	Зручність, підтримка великої кількості сценаріїв	Залежність від Інтернету, ризики для приватності	Amazon Alexa, Google Assistant, Apple Siri

У порівнянні видно, що кожне рішення має свої плюси та мінуси. Хмарні платформи найбільш функціональні та зручні, але залежать від Інтернету і можуть мати проблеми з приватністю. Локальні системи є менш залежними від зовнішніх факторів і зберігають більшу приватність, однак їх функціональність може бути обмежена, а налаштування – складнішими. Гібридні системи забезпечують більшу гнучкість, поєднуючи обидва підходи, але їх інтеграція може бути складною. Голосові помічники зручні і прості в управлінні, однак вони також залежать від Інтернету і можуть створювати ризики для конфіденційності користувача. Для поліпшення таких систем слід зосередитися на підвищенні рівня безпеки, оптимізації роботи без Інтернету та покращенні приватності користувачів.

2.1 Технології голосового управління в розумних будинках

Голосове управління стало однією з найзручніших технологій для керування "розумними будинками". Вона дозволяє користувачам взаємодіяти з домашніми пристроями та системами, використовуючи лише голосові

команди, що особливо корисно для людей з обмеженими можливостями або в ситуаціях, коли руки зайняті. Основними технологіями, що забезпечують голосове управління, є хмарні голосові помічники, спеціалізовані мікроконтролери та локальні голосові системи на базі апаратних платформ, таких як Arduino.

Голосове управління має певні обмеження. Залежність від якості звуку – шум, акценти або помилки в розпізнаванні можуть ускладнити правильне виконання команд. Крім того, для роботи голосових помічників необхідно постійне підключення до Інтернету, що може створити додаткові труднощі в разі проблем з мережею. Крім того, питання приватності стає критично важливим, оскільки голосові дані користувача обробляються на сторонніх серверах.

Порівняно з голосовим управлінням, мобільні додатки дозволяють більш гнучко налаштовувати систему та моніторити пристрої через смартфон, що дає змогу здійснювати управління з будь-якої точки світу. Проте цей метод потребує постійного підключення до Інтернету і зазвичай вимагає фізичного контакту з пристроєм, що не завжди зручно. Також важливо враховувати, що функціонування мобільного додатка залежить від працездатності самого смартфона.

Інші методи управління, такі як сенсори руху або дотику, автоматично реагують на зміну положення або фізичний контакт. Цей підхід дозволяє значно зменшити необхідність у фізичному чи голосовому вводу, підвищуючи ефективність енергозбереження через автоматичне вмикання/вимикання пристроїв. Однак сенсори мають обмежену дальність дії та можуть не спрацьовувати в специфічних умовах. У свою чергу, пульти дистанційного управління є простими в експлуатації та не потребують Інтернету, але їх можливості часто обмежені, а для їх використання необхідно мати пульт під рукою.

Метод голосового управління дозволяє користувачам легко взаємодіяти з пристроями за допомогою природного мовного вводу. Це робить його

доступним навіть для людей без технічного досвіду. Голосове управління дозволяє виконувати команди без використання рук, що особливо зручно, коли людина зайнята іншими справами, наприклад, приготуванням їжі або водінням. Також цей метод забезпечує можливість дистанційного керування пристроями, навіть перебуваючи в іншій кімнаті або на відстані. Інтеграція з голосовими помічниками, такими як Google Assistant, Amazon Alexa або Apple Siri, розширює можливості управління різними сервісами та пристроями. Голосове управління є корисним і для людей з обмеженими можливостями, адже дозволяє керувати пристроями без необхідності використовувати фізичні рухи або складні маніпуляції. Ці переваги роблять голосове управління ефективним і зручним варіантом для широкого кола користувачів.

Локальні системи голосового управління системи можуть бути обмежені за функціональністю порівняно з хмарними, але вони забезпечують обробку голосових команд безпосередньо на пристрої, що підвищує приватність користувача, а також можливість програмування для виконання базових команд, таких як ввімкнення/вимкнення світла або керування мотором. Одним із варіантів локального голосового управління на Arduino є використання спеціальних модулів, наприклад, Elechouse Voice Recognition Module V3, який дозволяє зберігати та розпізнавати до 15 попередньо записаних команд. Такий підхід підходить для базових систем "розумного будинку", але має обмежену кількість команд і потребує налаштування для кожного користувача.

Гібридні голосові системи поєднують локальну обробку простих команд із можливістю інтеграції з хмарними сервісами для розширених функцій. Наприклад, платформи на основі ESP32 можуть використовувати локальні модулі для простих команд та автоматично перемикатися на хмарний сервіс, якщо потрібна більш складна обробка. Це дає змогу виконувати критично важливі команди без затримок, такі як вимкнення світла або активація сигналізації, а також використовувати хмарні ресурси

для отримання складних даних або комунікації з іншими "розумними" пристроями.

Гібридні системи забезпечують баланс між зручністю хмарних сервісів та приватністю локальних рішень, але їх реалізація потребує продуманої інтеграції, щоб користувачі могли безпечно перемикатися між хмарним і локальним режимами.

Основними викликами в розвитку голосового управління для "розумних будинків"[4] є забезпечення точності розпізнавання команд в умовах шуму, а також можливість локалізації джерела звуку, щоб визначати зону, у якій перебуває користувач. Це особливо важливо для великих багатокімнатних просторів. Методи визначення позиції джерела звуку, такі як Time of Arrival (ToA) та Time Difference of Arrival (TDoA), дозволяють підвищити точність локалізації користувача та поліпшити взаємодію з голосовими системами.

У перспективі розвитку голосового управління для "розумного будинку" передбачається розробка локальних систем розпізнавання з машинним навчанням для обробки команд без необхідності в Інтернет-з'єднанні, а також інтеграція з більш точними датчиками та алгоритмами обробки звуку для покращення точності позиціювання голосових команд. Впровадження технологій машинного навчання на мікроконтролерах, таких як ESP32, дозволить адаптувати голосові команди до різних користувачів і умов навколишнього середовища. Реалізація запропонованих методів забезпечить підвищення точності та надійності систем голосового управління "розумним будинком", що дозволить автоматично активувати пристрої відповідно до місцезнаходження користувача, підвищуючи загальний комфорт і ефективність взаємодії з системою. Вдосконалення системи шляхом інтеграції додаткових сенсорів і застосування методів машинного навчання для адаптації до різних умов навколишнього середовища дозволить значно підвищити точність локалізації джерела звуку. Використання потужних мікроконтролерів, таких як ESP32, також дозволить підтримувати

складніші алгоритми обробки звуку і покращити продуктивність системи в умовах багатокімнатного простору або комерційних будівель.

Таким чином, голосове управління є важливою технологією для "розумного будинку", що дозволяє автоматизувати управління домашніми пристроями. Поєднання хмарних та локальних рішень дає змогу створювати індивідуальні, зручні та ефективні системи, що відповідають різноманітним потребам користувачів, забезпечуючи високу точність і надійність управління в умовах реального середовища.

2.2 Фізична природа звуку

Для визначення місця розташування джерела звуку важливо розуміти фізичні основи звуку, принципи його поширення та використовувати ці знання для створення систем позиціювання. Звук – це механічна хвиля, яка поширюється через матеріальне середовище (таке як повітря, вода або тверді тіла) завдяки коливанням частинок цього середовища. Він виникає, коли джерело звуку, наприклад, голосові зв'язки або мембрана динаміка, викликає коливання молекул у середовищі.[7] Ці коливання створюють зони стискання та розрідження, які поширюються у вигляді хвилі. Звук є хвильовим явищем, яке може бути поздовжнім або поперечним: у газах і рідинах він поширюється у вигляді поздовжніх хвиль, коли частинки коливаються паралельно до напрямку поширення звукової хвилі.

Частота – це параметр, який визначає кількість коливань звукової хвилі за одну секунду і вимірюється в герцах (Гц). Вона відповідає за висоту звуку: низькі частоти (менше 250 Гц) відповідають за низькі звуки, середні частоти (250–4000 Гц) – за середні тони, а високі частоти (понад 4000 Гц) відповідають за високі тони. Частота є важливим показником для ідентифікації голосу, інструментів та інших джерел звуку.

Амплітуда характеризує величину звукових коливань і визначає гучність звуку. Більша амплітуда означає вищий рівень гучності, тоді як

менша амплітуда відповідає за тихіші звуки. Амплітудні характеристики звуку використовуються для аналізу інтенсивності сигналу, а також для його нормалізації та оптимізації у записах.[6]

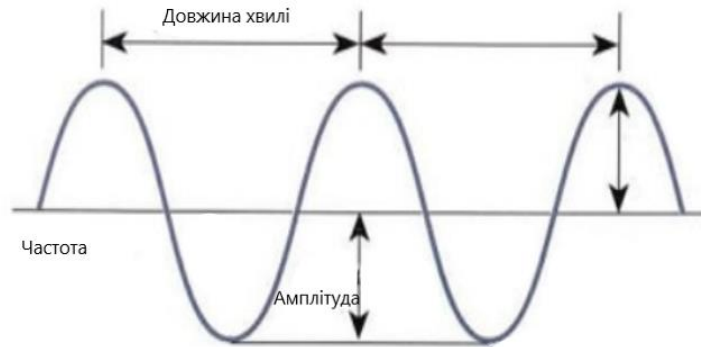


Рисунок 2.1 – Звукова хвиля

Значення довжини хвилі відповідає одній з наступних формул:

$$\lambda = V \times T,$$

де λ – довжина хвилі, V – швидкість поширення звукової хвилі, T – період хвилі (с).

Фаза відображає початкове зміщення хвилі, тобто її положення у часі. Це менш помітний для слухача параметр, але важливий для обробки сигналу. Наприклад, різниця фаз між кількома сигналами використовується в просторовому розташуванні джерел звуку, що має значення для стереозапису або об'ємного звуку.

Швидкість поширення звуку залежить від середовища та його фізичних властивостей, зокрема температури, тиску та щільності. У повітрі при температурі 20°C звук поширюється зі швидкістю близько 343 м/с, тоді як у воді – приблизно 1500 м/с, а в металі, такому як сталь, – близько 5000 м/с. Основними параметрами звуку є амплітуда, яка визначає гучність, і частота, що визначає висоту звуку. Амплітуда звукової хвилі пов'язана з

інтенсивністю звуку, де велика амплітуда означає більшу гучність. Частота хвилі визначає висоту звуку і вимірюється в герцах (Гц): низькі частоти сприймаються як низькі тони, а високі – як високі. Довжина хвилі звуку – це відстань між двома послідовними зонами стискання або розрідження і залежить від частоти звукової хвилі та швидкості звуку в середовищі.

Аналіз інтенсивності звуку дозволяє визначати рівень гучності в децибелах і застосовується для вимірювання рівнів шуму, що корисно в акустичних дослідженнях. Дослідження швидкості звуку у різних середовищах допомагають зрозуміти, як різні матеріали впливають на швидкість звуку, що є важливим для проектування матеріалів для звукоізоляції.

Реверберація – це акустичне явище, яке виникає, коли звукові хвилі багаторазово відбиваються від різних поверхонь (стін, стелі, підлоги та інших об'єктів) у замкненому просторі, створюючи враження «продовження» звуку. Кожне відбиття звукової хвилі досягає слухача через певний час після основного сигналу, накладаючись на нього, що дає відчуття тривалого звучання навіть після того, як джерело звуку припиняє своє випромінювання [11].

Реверберація має важливе значення для акустики приміщень, оскільки вона впливає на чіткість, гучність і загальне сприйняття звуку.[13] У великих приміщеннях з твердими, відбиваючими поверхнями (наприклад, у концертних залах, театрах чи храмах) реверберація може підсилювати звук, роблячи його об'ємнішим. Однак при надмірній реверберації звук може ставати розмитим і нечітким, що особливо важливо для тих приміщень, де важлива ясність мови, наприклад, у конференц-залах або студіях звукозапису [5].

Для характеристики реверберації використовуються такі параметри, як час реверберації та дифузність (RT60). Час реверберації – це період, за який інтенсивність звуку знижується на 60 децибел після припинення джерела звуку. Відповідно до призначення приміщення, оптимальний час реверберації може варіюватися. Наприклад, для класичних концертних залів зазвичай потрібно близько 1,5-2,5 секунди, тоді як для лекційних аудиторій

цей час має бути меншим (менше 1 секунди), щоб уникнути злиття слів. Дифузність визначає рівномірність реверберації в просторі: у приміщеннях з високою дифузністю реверберація розповсюджується рівномірно, тоді як недостатня дифузність може призвести до ефекту «ехо» в окремих зонах приміщення.

Реверберація може бути як бажаною, так і небажаною в залежності від типу приміщення та вимог до звуку. Для музичних перформансів, наприклад, реверберація додає об'ємності і емоційної глибини звуку, тоді як для приміщень, де важлива чіткість мови (наприклад, конференц-зали або студії звукозапису), її прагнуть мінімізувати. У сучасному дизайні для контролю реверберації використовуються звукоізоляційні матеріали, звукопоглинаючі панелі, килими та м'які меблі, які допомагають зменшити відбиття звуку і скоротити час реверберації.

Однак реверберація створює серйозні труднощі для систем, які використовують методи визначення відстані до джерела звуку, такі як Time of Arrival (ToA) або Time Difference of Arrival (TDoA). Додаткові відбиті звукові хвилі, які накладаються на основний сигнал, ускладнюють точне визначення часу прибуття звуку. Це може призвести до численних затримок і спотворення часових вимірювань, необхідних для точного розрахунку відстані.

Реверберація також викликає неоднозначність у визначенні початкового часу прибуття сигналу, оскільки система може помилково прийняти відбитий звук за основний. В результаті, визначення відстані або напрямку на джерело звуку може бути неточним. Крім того, інтенсивність звуку в умовах реверберації може бути нерівномірною через багаторазові відбиття, що впливає на методи визначення відстані, засновані на інтенсивності звуку. Відбиті хвилі можуть посилювати або послаблювати сигнал, що створює хибне уявлення про відстань.

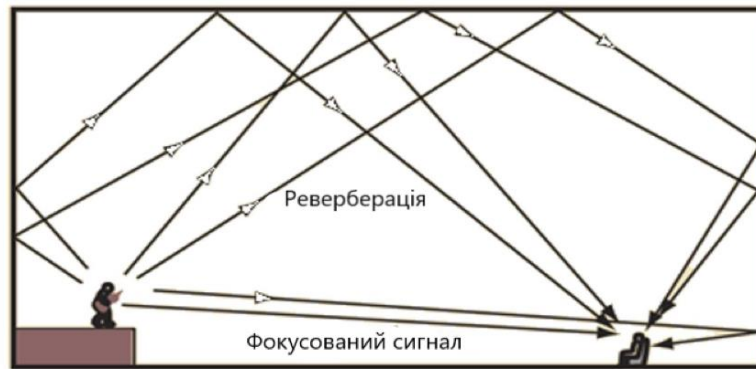


Рисунок 2.2 — Зображення ефекту реверберації

Щоб мінімізувати вплив реверберації при визначенні відстані до джерела звуку, можна застосовувати різні методи корекції, такі як фільтрація сигналу для виділення первинного імпульсу і відсікання відбитих хвиль. Алгоритми, які використовують часові вікна, можуть фокусуватися тільки на першому сильному імпульсі звуку, ігноруючи відбиті хвилі, що надходять із затримкою. Це дозволяє значно покращити точність вимірювань і зменшити негативний вплив реверберації на систему визначення відстані.

Температура і вологість повітря також можуть впливати на швидкість звуку, що, у свою чергу, вплине на точність вимірювань. Зміни в цих параметрах можуть призвести до систематичних помилок у визначенні відстані до джерела звуку. Щоб зменшити такі похибки, можна проводити вимірювання температури та вологості у приміщенні з подальшою корекцією швидкості звуку, а також регулярно калібрувати систему відповідно до зовнішніх умов.

Для визначення місця розташування джерела звуку важливо розуміти фізичні основи звуку, принципи його поширення та використовувати ці знання для створення систем позиціювання.

Похибки у визначенні позиції джерела звуку можуть виникати через геометричні та апаратні фактори. Геометричні похибки з'являються, якщо мікрофони розміщені не оптимально. Наприклад, розташування мікрофонів

надто близько один до одного або в певних нераціональних конфігураціях ускладнює визначення точного місця розташування джерела звуку.

Таблиця 2.1 – Основні методи позиціювання джерела звуку

Метод позиціювання	Принцип дії	Переваги	Недоліки	Приклад використання
Time of Arrival (ToA)	Вимірювання часу прибуття звуку до кожного мікрофона, обчислення відстані на основі швидкості звуку	Висока точність на коротких відстанях	Вимагає точного часу початку сигналу	Малі приміщення, де важлива висока точність
Time Difference of Arrival (TDoA)	Вимірювання різниці в часі прибуття сигналу до кількох мікрофонів, визначення положення за допомогою триангуляції	Не вимагає знання початку сигналу, висока точність для великих просторів	Потребує кількох мікрофонів і потужного процесора	Багатокімнатні системи розумного будинку
Метод кута прибуття	Оцінка кута підходу звукового сигналу, що надходить одночасно до декількох мікрофонів	Підходить для невеликих приміщень	Чутливий до перешкод і змін напрямку	Невеликі офіси, кімнати з обмеженою кількістю мікрофонів
Angle of Arrival (AoA)	Визначення кута прибуття звукової хвилі за допомогою двох мікрофонів, розташованих один навпроти одного	Підходить для обмеженого простору	Низька точність при зміні напрямку звуку	Локалізація звуку в невеликих кімнатах
Sound Intensity Method	Оцінка рівня інтенсивності звуку з урахуванням зниження амплітуди при збільшенні відстані	Простий у реалізації, не потребує точного часу початку	Низька точність, чутливість до шуму	Невеликі приміщення, прості додатки

Оптимальне розташування, таке як трикутна конфігурація, покращує точність, а моделювання акустичних умов приміщення з використанням спеціалізованого програмного забезпечення допомагає підібрати найбільш підходящі точки для мікрофонів. Позиціонування джерела звуку є ключовим аспектом для забезпечення точності голосового управління в системах "розумного будинку". Це завдання особливо актуальне для великих просторів або багатокімнатних приміщень, де необхідно визначити, з якої зони надходить команда, щоб уникнути помилкової активації пристроїв. У таблиці 2.1 наведено основні методи позиціонування джерела звуку.

Метод AoA визначає кут, під яким звукова хвиля досягає двох або більше мікрофонів. Він ефективний у невеликих просторах, де потрібно визначити лише напрямок на джерело звуку, але не обов'язково точну відстань до нього. При використанні кількох мікрофонів, розташованих під відомим кутом, система може визначити, з якого напрямку надійшов звук.[9] Для двох приймачів (наприклад, антен або мікрофонів), розташованих на відстані d один від одного, кут прибуття сигналу θ обчислюється за формулою:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta d}{d}\right)$$

де θ – кут прибуття сигналу;

$\Delta d = v \cdot \Delta t$ – різниця шляху між сигналом, що доходить до кожного приймача;

v – швидкість сигналу в середовищі (наприклад, швидкість звуку в повітрі або швидкість світла для радіосигналів);

Δt – різниця часу прибуття сигналу до кожного приймача;

d – відстань між приймачами.

Якщо замість різниці часу ми вимірюємо різницю фаз $\Delta\phi$ між сигналами, прийнятими на двох антенах, то кут прибуття можна визначити за формулою:

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\lambda \Delta \phi}{2\pi d} \right)$$

де λ – довжина хвилі сигналу;

$\Delta \phi$ – різниця фаз сигналів на двох приймачах;

d – відстань між приймачами.

Sound Intensity Method передбачає обчислення відстані на основі зменшення амплітуди звукового сигналу з відстанню. Якщо відомо потужність джерела звуку, то інтенсивність у точці прийому можна використати для оцінки відстані до джерела. Цей метод підходить для приблизного визначення відстані, однак він чутливий до шумів і перешкод.

Застосування на Arduino Uno може використовувати датчики інтенсивності звуку для вимірювання рівня сигналу, але результати можуть бути неточними через вплив шумів і змін середовища.

Формула для розрахунку інтенсивності звуку виглядає так:

$$I = \frac{p \cdot v}{2}$$

де I – інтенсивність звуку (Вт/м²);

p – середньоквадратичний звуковий тиск (Па);

v – швидкість частинок у напрямку поширення хвилі (м/с).

Оскільки вимірювання швидкості частинок може бути складним, інтенсивність часто обчислюється через звуковий тиск та акустичний імпеданс середовища. У цьому випадку формула для інтенсивності звуку стає такою:

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

де p – середньоквадратичний звуковий тиск (Па),

ρ – густина середовища (кг/м³),

c – швидкість звуку в середовищі (м/с).

Серед доступних методів для визначення положення джерела звуку у "розумних будинках" виділяються методи вимірювання часу прибуття звукового сигналу (Time of Arrival, ToA) та різниці часу прибуття (Time Difference of Arrival, TDoA). Обидва підходи дозволяють точно позиціювати джерело звуку в просторі, що може бути особливо корисним для ефективного управління системами в багатокімнатних приміщеннях.

Метод ToA ґрунтується на вимірюванні часу, необхідного для прибуття звуку до приймача, що дозволяє обчислити відстань до джерела.[10] Завдяки високій точності, ToA використовується в акустичних камерах та інших системах, що потребують ретельної локалізації звуку. Проте, цей метод потребує високої швидкості обробки даних і точної синхронізації між мікрофонами, що є викликом для Arduino Uno, але можливим для ESP32 завдяки його більшій обчислювальній потужності.

Формула для визначення відстані:

$$d = v \cdot t$$

де d – відстань до джерела звуку (м),

v – швидкість звуку (приблизно 343 м/с при температурі 20°C),

t – час, за який звук досягає мікрофона (с).

Метод TDoA, у свою чергу, заснований на аналізі різниці часу прибуття звуку до декількох мікрофонів, що дає змогу визначати положення джерела за допомогою триангуляції, навіть без точного знання моменту його виникнення. Цей метод підходить для великих приміщень, таких як конференц-зали, де важливо відслідковувати положення джерела звуку. [8]. Хоча Arduino Uno має обмеження для реалізації TDoA через обмежену

потужність, ESP32 може підтримувати базову реалізацію цього методу з кількома мікрофонами.

Формула для обчислення різниці відстані:

$$\Delta d = v \cdot \Delta t$$

де Δd – різниця у відстанях до джерела звуку між двома мікрофонами,

v – швидкість звуку (343 м/с),

Δt – різниця у часі прибуття звукового сигналу до двох мікрофонів.

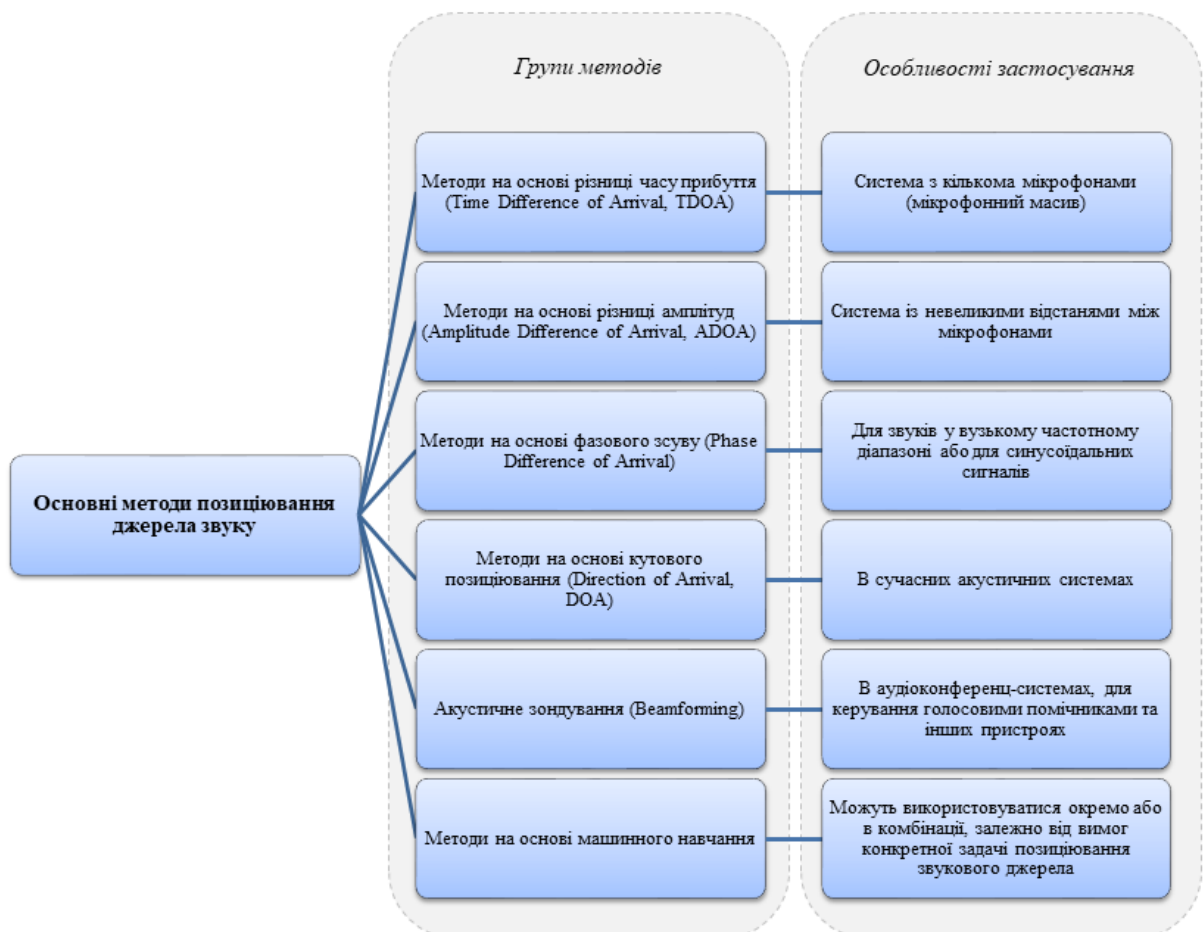


Рисунок 2.3 – Систематизація методів визначення джерела звуку

З-поміж доступних методів позиціонування джерела звуку, метод Time Difference of Arrival (TDoA) є найбільш перспективним для створення точних

систем голосового управління у "розумному будинку", оскільки він дозволяє визначити положення джерела звуку, не вимагаючи знання точного часу початку сигналу. Arduino Uno має певні обмеження для реалізації таких систем через малу обчислювальну можливість, але даний фактор компенсується у поєднанні з потужнішою платформою ESP32

Зважаючи на обмежені обчислювальні ресурси Arduino Uno, використання методів ToA та TDoA на цій платформі може бути реалізоване для базових прототипів. Зокрема, TDoA є найбільш перспективним методом для систем "розумного будинку", оскільки він не вимагає знання початкового моменту сигналу і дозволяє досягти відносно високої точності при використанні кількох мікрофонів. Однак для складних систем позиціонування Arduino Uno може потребувати додаткових модулів або заміни на потужніший контролер, наприклад, ESP32, який забезпечує швидшу обробку сигналів від кількох мікрофонів.

2.3 Вибір елементної бази пристрою

В якості датчика звукового сигналу в роботі використано всеспрямований мікрофонний модуль INMP441, основні характеристики, принципи роботи, застосування та роль якого у дослідженні висвітлені далі (рисунок 2.4).

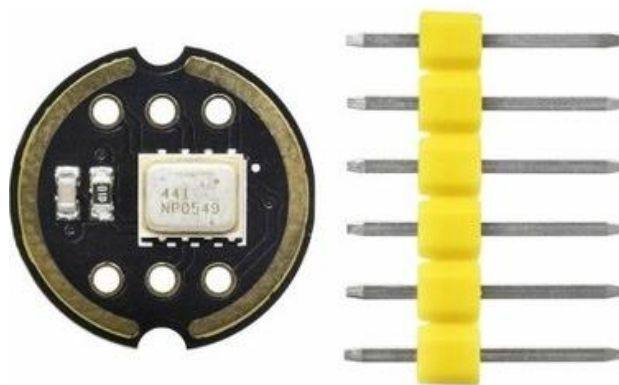


Рисунок 2.4 – Використаний мікрофонний модуль INMP441

Вибір було зупинено на цьому мініатюрному цифровому MEMS мікрофоні від компанії InvenSense, оскільки він призначений для контролю акустичної мовленнєвої інформації в мобільних пристроях та системах домашньої автоматизації. Може підключатися безпосередньо до цифрового процесора DSP або до контролерів із використанням кодеків, що повністю відповідає темі дослідження.

Основні технічні характеристики модуля є релевантними до дослідження. Досліджуваний тип мікрофона – MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) із чутливістю $-26 \text{ dBFS} \pm 1 \text{ dB}$. Динамічний діапазон становить до 65 дБ, частотний діапазон варіюється від 60 Гц до 15 кГц. Для передачі цифрових даних використовується інтерфейс I2C. Необхідне живлення – 1.8 В - 3.3 В. Підтримує стереорежим через конфігурацію WS (Word Select).

INMP441 використовує MEMS-технологію, що забезпечує високоточне перетворення акустичних сигналів у цифрову форму без необхідності використання додаткового аналого-цифрового перетворювача. Інтеграція I2C-інтерфейсу спрощує підключення мікрофона до мікроконтролерів або комп'ютерних систем.

У цьому дослідженні INMP441 використовується для збирання звукових даних у реальному часі з подальшою обробкою сигналу для задач голосового розпізнавання. Завдяки високій чутливості та низькому рівню спотворень, модуль дозволяє точно аналізувати акустичні параметри та забезпечує необхідну якість даних для розробки алгоритмів обробки звуку. Слід відзначити, що обмеженням є частотний діапазон, який може бути недостатнім для задач, пов'язаних із детальним аналізом низькочастотних звуків.

Для реального часу обробки аудіосигналів в роботі застосовано цифровий сигнальний процесор ADAU1401 (рисунок 2.5), розроблений компанією Analog Devices. У цьому дослідженні DSP застосовується для

аналізу звукових сигналів із кількох мікрофонів з метою визначення відстані до джерела звуку в системі управління елементами розумного будинку.



Рисунок 2.5 – Використаний цифровий сигнальний процесор ADAU1401

ADAU1401 DSP забезпечує обробку звукових сигналів із високою точністю завдяки інтегрованим АЦП і ЦАП із роздільною здатністю 24 біти, що дозволяє отримувати і відтворювати звук із мінімальними спотвореннями. Вбудовані інтерфейси I2C і SPI полегшують інтеграцію з іншими модулями розумного будинку.[4]

Для об'єктивності додаємо оцінку сильних і слабких сторін DSP у контексті дослідження. Перевагами є:

- висока точність обробки звукових сигналів;
- низьке енергоспоживання, що важливо для систем розумного будинку;
- простота інтеграції з іншими пристроями через стандартні інтерфейси.

До недоліків можна віднести:

- обмежена обчислювальна потужність для задач із великою кількістю мікрофонів;
- вимога до належної конфігурації SigmaStudio для складних алгоритмів.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики ADAU1401

Характеристика	Значення
Тип процесора	Програмований цифровий сигнальний процесор (DSP)
Розрядність обробки	28 біт
Аналого-цифровий перетворювач (ADC)	2 канали, 24 біти
Цифро-аналоговий перетворювач (DAC)	4 канали, 24 біти
Частота дискретизації	До 192 кГц
Програмування	Графічне середовище SigmaStudio
Інтерфейси	I2C, SPI
Пам'ять для обробки	1024 інструкції програми
Живлення	3.3 В (цифрова частина) / 3.3 В або 5 В (аналогова частина)
Діапазон температури	-40°C до +85°C
Фільтри	Вбудовані FIR та IIR фільтри
Додаткові функції	- Подвійний порт серійного аудіо - Інтегровані осцилятори для роботи без кварцу
Енергоспоживання	Низьке, підходить для портативних і вбудованих систем
Розміри корпусу	48-вивідний корпус LQFP (7 мм × 7 мм)

Хоча ADAU1401 забезпечує високу точність і стабільність роботи, його обчислювальна потужність може бути недостатньою для обробки сигналів у системах із великою кількістю мікрофонів або складними алгоритмами, що потребують більш ресурсомістких процесорів. В роботі передбачено використання максимальної кількості мікрофонів, яка становить – 4.

Опис основних можливостей та характеристик ADAU1401 DSP наведено у таблиці 2.2.

В рамках роботи на цифровий сигнальний процесор ADAU1401 потенційно можуть бути покладені наступні функції:

- фільтрація сигналів (попереднє очищення звуку від шумів і небажаних частотних компонентів);
- кроскореляція (обчислення затримок між сигналами для визначення різниці часу прибуття (Time Difference of Arrival, TDOA));
- оцінка відстані (на основі TDOA визначається позиція джерела звуку відносно мікрофонів);
- адаптивна обробка (використання налаштовуваних фільтрів та обчислювальних блоків для адаптації алгоритму до змін у середовищі).

В якості платформи для розробки мікроконтролерних систем було обрано платформу Arduino, яка надає широкі можливості для творчості та інновацій у сфері електроніки і автоматизації.

Основною складовою платформи Arduino є мікроконтролери, які виконують роль основного керуючого елемента в системі. Arduino підтримує різні моделі мікроконтролерів, такі як Arduino Uno, Arduino Mega, Arduino Nano та інші. Кожен з цих мікроконтролерів має свої особливості і можливості, але всі вони забезпечують простоту використання та розширення.

Одним з головних переваг платформи Arduino є легкість програмування. Для написання програм для Arduino використовується мова програмування C/C++, яка є відомою та поширеною серед розробників. Arduino IDE (Integrated Development Environment) - це спеціальне програмне забезпечення, що надає зручний інтерфейс для написання, компіляції та

завантаження програм на мікроконтролер Arduino. Це дозволяє навіть початківцям швидко освоїти програмування мікроконтролерів і створювати власні проекти.

У таблиці 2.3 приведено основні характеристики.

Arduino Uno може живитися від USB або зовнішнього джерела живлення – тип джерела вибирається автоматично.

В якості зовнішнього джерела живлення (не USB) може використовуватися мережевий AC/DC-адаптер або акумулятор/батарея. Роз'єм адаптера (діаметр – 2.1мм, центральний контакт – позитивний) потрібно вставити в відповідний роз'єм живлення на платі. У разі живлення від акумулятора/батареї, її проводи потрібно під'єднати до виводів Gnd та Vin роз'єма POWER.

Таблиця 2.3 – Характеристики Arduino uno

Мікроконтролер: ATmega328
Робоча напруга: 5В
Рекомендована напруга живлення: 7-12В
Максимальна напруга живлення: 6-20В
Цифрові входи/виходи: 14 (з них 6 можуть використовуватись як ШИМ-виходи)
Аналогові входи: 6
Максимальний струм одного виходу: 40 мА
Максимальний вихідний струм виходу 3.3В: 50 мА
Flash-пам'ять: 32 КБ (ATmega328), з яких 0.5 КБ використовуються завантажувачем
SRAM: 2 КБ (ATmega328)
EEPROM: 1 КБ (ATmega328)
Тактова частота: 16 МГц

Напруга зовнішнього джерела живлення може бути в межах від 6 до 20 В. Однак, зниження напруги живлення нижче 7В призводить до зменшення напруги на виводі 5V, що може стати причиною нестабільної роботи пристрою. Використання напруги більше 12В може призвести до перегріву стабілізатора напруги та виходу плати з ладу. З урахуванням цього, рекомендується використовувати джерело живлення з напругою в діапазоні від 7 до 12В.

VIN. Напруга, що надходить в Arduino безпосередньо від зовнішнього джерела живлення (не пов'язана з 5В від USB або іншої стабілізованої напруги). Через цей вивід можна як подавати зовнішнє живлення, так і споживати струм, коли пристрій живиться від зовнішнього адаптера.

5V. На вивід надходить напруга 5В від стабілізатора напруги на платі, незалежно від того, як пристрій живиться: від адаптера (7 - 12В), від USB (5В) або через вивід VIN (7 - 12В). Живити пристрій через виводи 5V або 3V3 не рекомендується, оскільки в цьому випадку не використовується стабілізатор напруги, що може призвести до виходу плати з ладу.

3V3. 3.3В, що надходять від стабілізатора напруги на платі. Максимальний струм, що споживається з цього виводу, складає 50 мА.

IOREF. Цей вивід надає платам розширення інформацію про робочу напругу мікроконтролера Arduino. Залежно від напруги, зчитаної з виводу IOREF, плата розширення може перемкнутися на відповідне джерело живлення або задіяти перетворювачі рівнів, що дозволить їй працювати як з 5В, так і з 3.3В-пристроями.

Об'єм флеш-пам'яті ATmega328 становить 32 КБ (з яких 0.5 КБ використовуються завантажувачем). Мікроконтролер також має 2 КБ пам'яті SRAM і 1 КБ EEPROM (з якої можна зчитувати або записувати інформацію за допомогою бібліотеки EEPROM).

З використанням функцій pinMode(), digitalWrite() і digitalRead() кожен з 14 цифрових виходів може працювати як вхід або вихід. Рівень напруги на виходах обмежений до 5В. Максимальний струм, який може видавати або

споживати один вихід, становить 40 мА. Всі виходи мають вбудовані підтягуючі резистори (за замовчуванням вимкнені) з номіналом 20-50 кОм. Крім того, деякі виходи Arduino можуть мати додаткові функції:

Інтерфейс: виходи 0 (RX) і 1 (TX). Використовуються для отримання (RX) та передачі (TX) даних через серійний інтерфейс. Ці виходи пов'язані з відповідними виходами мікросхеми ATmega8U2, яка виконує роль USB-UART-конвертера.[1]

Зовнішні переривання: виходи 2 і 3. Можуть служити джерелами переривань, які виникають при фронті, спаді або низькому рівні сигналу на цих виходах. Для отримання додаткової інформації дивіться функцію `attachInterrupt()`.

ШИМ: виходи 3, 5, 6, 9, 10 і 11. За допомогою функції `analogWrite()` можуть видавати 8-бітні аналогові значення у вигляді ШИМ-сигналу.

SPI-інтерфейс: виходи 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). За допомогою бібліотеки SPI ці виходи можуть здійснювати зв'язок за допомогою SPI-інтерфейсу.

Світлодіод: 13. Вбудований світлодіод, підключений до виходу 13. При надсиланні значення HIGH світлодіод увімкнений, при надсиланні LOW - вимкнений.

У Arduino Uno є 6 аналогових входів (A0 - A5), кожен з яких може представляти аналогову напругу у вигляді 10-бітного числа (1024 різних значень). За замовчуванням, вимірювання напруги здійснюється відносно діапазону від 0 до 5 В. Однак, верхню межу цього діапазону можна змінити, використовуючи вихід AREF і функцію `analogReference()`. Крім того, деякі з аналогових входів мають додаткові функції.

TWI: вихід A4 або SDA і вихід A5 або SCL. За допомогою бібліотеки Wire ці виходи можуть здійснювати зв'язок за допомогою TWI-інтерфейсу.

AREF. Опорна напруга для аналогових входів. Може бути використана за допомогою функції `analogReference()`.

Скидання (Reset). Низький рівень напруги (LOW) на цьому виході призводить до перезавантаження мікроконтролера. Зазвичай цей вихід використовується для роботи кнопки скидання на розширювальних платах.

2.4 Бібліотеки для роботи з аналоговими сигналами

Для реалізації проекту TDoA (Time Difference of Arrival) у системі управління розумним будинком, необхідно використання бібліотек та апаратного забезпечення. Ось основні компоненти, які варто врахувати:

Фреймворки та програмні бібліотеки - Arduino IDE Arduino IDE (Integrated Development Environment) – це програмне забезпечення, яке використовується для написання, компіляції та завантаження коду на мікроконтролери Arduino. Воно підтримує кілька типів плат Arduino та дозволяє програмістам створювати проекти за допомогою мов програмування, таких як C і C++. Інтерфейс IDE включає редактор коду з підсвіткою синтаксису та автозавершенням, що полегшує процес написання програм. Після написання коду IDE компілює його, перевіряючи на помилки, і дозволяє завантажити готову програму на мікроконтролер через USB або інші підключення. Крім того, Arduino IDE має можливість моніторингу послідовного порту, що дозволяє переглядати дані, що надходять від Arduino, що корисно для налагодження програми. IDE також підтримує величезну кількість бібліотек, які дозволяють інтегрувати різноманітні датчики, дисплеї, мотори та інші периферійні пристрої, розширюючи функціональність плат Arduino. [3]

Мови програмування необхідні для написання коду проекту визначення відстані до джерела звуку на основі Arduino та ESP32 використовуються різні мови програмування, зокрема C/C++ і Python, в залежності від завдань, що ставляться перед системою.

Основною мовою для програмування мікроконтролерів Arduino та ESP32 є C/C++. Ці мови надають можливість створювати ефективний код для

роботи з апаратними компонентами, такими як мікрофони, датчики та мікроконтролери. Вони дозволяють здійснювати низькорівневу взаємодію з мікроконтролером, налаштовувати таймери, обробляти аналогові та цифрові сигнали, а також здійснювати переривання та комунікацію з іншими пристроями. C++ дає можливість використовувати об'єктно-орієнтоване програмування, що дає додаткові переваги для організації складних проєктів, підвищуючи модульність, розширюваність та зручність коду. Програмування на C/C++ є також необхідним для роботи з апаратними компонентами, такими як аналогово-цифрові перетворювачі (ADC) і для реалізації алгоритмів синхронізації часу, що є важливим для точного визначення відстані за методом Time Difference of Arrival (TDoA).[17]

Python, з іншого боку, використовується для більш складної обробки даних або для створення частини програми, що працює на більш потужних серверах або ПК. Python чудово підходить для аналізу великих обсягів даних, отриманих з кількох мікроконтролерів, оскільки надає широкі можливості для роботи з масивами даних, математичними операціями та статистичними алгоритмами. Використовуючи Python, можна реалізувати серверну частину програми, яка отримує дані через Wi-Fi або Bluetooth від ESP32, проводить аналіз даних і зберігає результати. Python також дозволяє створювати інтерфейси для моніторингу даних у реальному часі, візуалізувати їх у вигляді графіків або на карті будинку, що допомагає наочно показати результат визначення відстані до джерела звуку.

Завдяки використанню як C/C++ для мікроконтролерів, так і Python для серверної обробки, проєкт стає гнучким і масштабованим. Мікроконтролери виконують основну обробку в реальному часі, а сервер на Python займається складнішими обчисленнями і аналізом результатів з кількох мікроконтролерів, що дозволяє отримати більш точні дані та забезпечити інтеграцію з іншими системами розумного будинку.

Adafruit Sound Sensor – це бібліотека призначена для роботи з датчиками звуку, виробленими компанією Adafruit. Вона дозволяє вам легко

зчитувати дані з мікрофонних модулів, таких як електретні мікрофони або інші сенсори звуку. Бібліотека дозволяє отримувати рівень звуку, що вимірюється, а також визначати, коли звук досягнув певного порогу. Вона стане в нагоді для проектів, де необхідно відслідковувати наявність звуків або визначати рівень шуму. Це може бути корисно в системах моніторингу в розумному будинку для активації певних дій, коли звук перевищує встановлений поріг.

FFT (Fast Fourier Transform) для більш складного аналізу звукових хвиль, ніж просто визначення рівня звуку. FFT дозволяє виконати перетворення сигналу на частотну область, тобто розкласти звукову хвилю на її складові частоти. Це особливо корисно для точнішого визначення характеристик звуку, таких як частота, амплітуда, чи розпізнавання різних звукових сигналів. Використання FFT може допомогти в таких застосунках, як визначення типу звуку (наприклад, голос чи інші шуми), що підвищує точність визначення джерела звуку.[3]

Бібліотека Wire використовується для роботи з інтерфейсом I2C, що є стандартним для підключення різних датчиків і пристроїв. Вона дозволяє підключати мікрофони або інші звукові сенсори, які підтримують I2C, до Arduino або ESP32. Мікрофони з I2C інтерфейсом можуть мати вбудовану обробку сигналу, що зменшує потребу в додаткових апаратних компонентах і полегшує інтеграцію з іншими частинами системи. Ця бібліотека допомагає налаштувати правильне з'єднання і комунікацію між компонентами через I2C шину.

Бібліотеки для мережевих комунікацій - WiFi (для ESP32) або Ethernet - необхідні для підключення мікроконтролерів до мережі Інтернет або локальної мережі для передачі даних. Використовуючи ці бібліотеки, ваш мікроконтролер може відправляти інформацію про визначене місцезнаходження джерела звуку на сервер або інший пристрій, що знаходиться в мережі. Для ESP32, який має вбудований модуль Wi-Fi, бібліотека WiFi дозволяє підключати пристрій до бездротової мережі 2.4 ГГц

і отримувати доступ до Інтернету або локальної мережі. У разі використання Ethernet-розширення, ви можете підключити Arduino до Інтернету через кабель Ethernet, що особливо корисно для стаціонарних пристроїв у розумному будинку.

Для реалізації більш складної системи збору даних з кількох мікрофонів в розумному домі, можна використовувати протокол MQTT. Він дозволяє створити централізовану систему обміну повідомленнями між кількома мікроконтролерами. За допомогою бібліотеки MQTT, мікроконтролери можуть обмінюватися даними про місцезнаходження джерел звуку та передавати цю інформацію в центральний сервер або хаб розумного будинку. MQTT дозволяє зібрати всі дані про звукові події в одному місці для подальшого аналізу або прийняття рішень.

TDoA algorithm (Time Difference of Arrival)- основний алгоритм для визначення місцезнаходження джерела звуку. За допомогою методу Time Difference of Arrival, різниця в часі, з яким звук досягає різних мікрофонів, використовується для обчислення координат джерела. Алгоритм працює на основі того, що відстань до джерела звуку може бути визначена через різницю в часі, коли сигнал досягає кожного мікрофону. Цей метод дуже точний, якщо мікрофони правильно синхронізовані і знаходяться в певній геометрії, що дозволяє зменшити похибки. Для реалізації такого алгоритму на Arduino або ESP32 можуть використовуватися додаткові математичні бібліотеки для точних обчислень.

Для покращення точності визначення місця джерела звуку алгоритм фільтрації Калмана, який дозволяє відфільтрувати шум і помилки вимірювань, що з'являються через неточності мікрофонів або зовнішні фактори, такі як реверберація або фоновий шум. Фільтр Калмана коригує вимірювання та забезпечує більш точні результати, навіть коли вхідні дані мають похибки або шум. Це важливо для розв'язання проблеми точності в реальних умовах.

3 ОПИС МЕТОДОЛОГІЇ РІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Досягнення високої точності та швидкості визначення відстані до джерела звуку у різних зовнішніх умовах залежить від:

- конфігурації системи мікрофонів;
- використаного алгоритму обробки звукового сигналу (ToA, TDoA, Sound Intensity Method, методи машинного навчання).

Конфігурація системи мікрофонів у системі (кутове розташування, дистанція між ними) значно впливає на покращення точності визначення місця джерела звуку. Тому доцільним є дослідження та визначення в умовах, наближених до ідеальних, конфігурації системи мікрофонів.

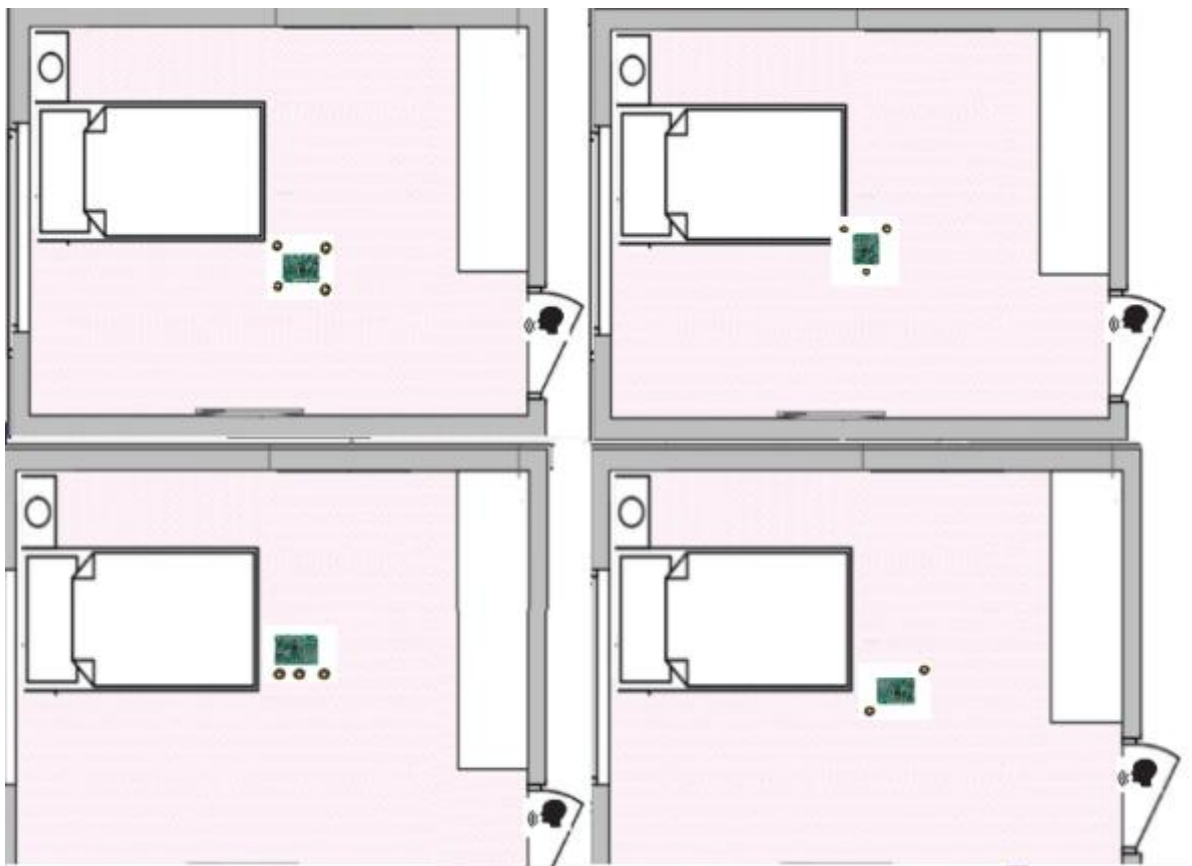


Рисунок 3.1 – Демонстрація розташування джерела звуку та мікрофонів

3.1 Виконання експерименту у контрольованих умовах

Експерименти у контрольованих умовах у приміщенні без зовнішніх перешкод та шумів виконується для оцінки базової точності системи у залежності від напрямку та конфігурації розміщення мікрофонів.

Таблиця 3.1 – Вплив напрямку розміщення мікрофонів та конфігурації матриці мікрофонів (відстань між ними) на точність та швидкість визначення відстані до джерела звуку.

Обрана конфігурація розміщення мікрофонів	ToA	TDoA	Sound Intensity Method
	Визначена відстань до джерела звуку, м	Час визначення, мс	Визначена відстань до джерела звуку, м
Конфігурація трикутник	3.02	15	3.05
Конфігурація квадрат	3.00	12	3.01
Конфігурація діагональ	3.01	11	3.03
Конфігурація лінія	3.04	15	3.06

Аналізуючи таблицю, можна зробити кілька висновків. Трикутна конфігурація мікрофонів показує помірну точність із відносно більшим часом обробки. Відстань ToA та TDoA мають вищі значення, що вказує на більш складну геометрію в порівнянні з іншими конфігураціями. Розташування мікрофонів у центрі кімнати у вигляді квадрата є найбільш раціональним з кількох причин. По-перше, квадратна конфігурація

забезпечує симетричне розподілення мікрофонів відносно джерела звуку, яке знаходиться в центрі кімнати. Це дозволяє максимально точно вимірювати час приходу звуку (ToA) та різницю у часі приходу (TDoA) на кожному мікрофоні, оскільки всі мікрофони знаходяться на однаковій відстані від джерела і між собою.[15]

По-друге, квадратне розташування зменшує ймовірність виникнення перехресних спотворень, які можуть з'являтися при випадковому розміщенні мікрофонів, оскільки мікрофони, розташовані в кутах квадрата, забезпечують краще покриття зони і більш чітке визначення напрямку джерела. Це важливо для алгоритмів, що використовують різницю у часі приходу для точного локалізування звуку.

Крім того, квадратна конфігурація має переваги в плані обчислювальної ефективності. Оскільки мікрофони розташовані симетрично, алгоритми обробки сигналу можуть швидше і точніше обчислювати місце розташування джерела звуку, мінімізуючи необхідність в додаткових обчисленнях для компенсації нерівномірного розміщення.[6]

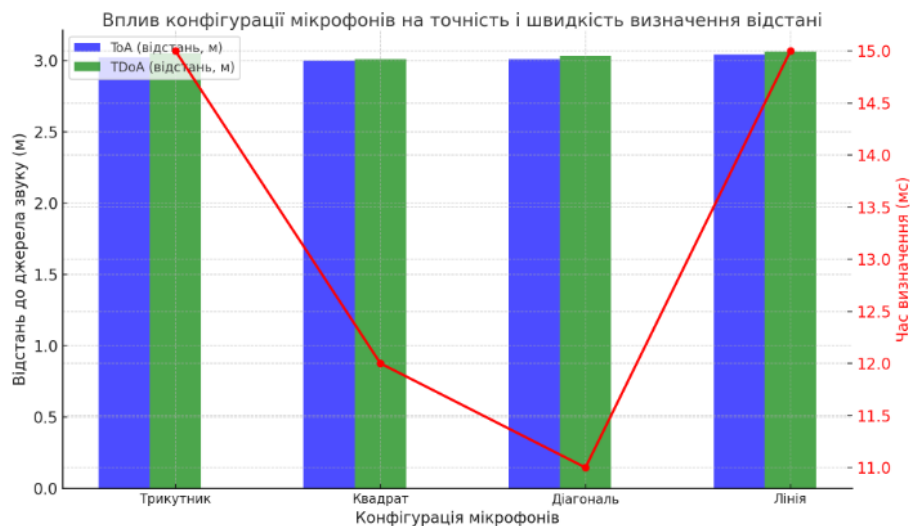


Рисунок 3.2 – графік впливу конфігурації мікрофонів

Таким чином, розташування мікрофонів квадратом у центрі кімнати дає оптимальне співвідношення точності, швидкості обробки і надійності, що

робить цю конфігурацію найбільш раціональною для завдань локалізації джерел звуку.

3.2 Виконання експерименту з відтворення шуму з різними рівнями дБ

Для проведення експерименту був відтворений шум з різними рівнями звукового тиску для перевірки системи шумоподавлення мікрофона. Для генерації шуму використовувалося, програмне забезпечення де був створений білий шум тривалістю 10 секунд для кожного рівня гучності. Шум був відтворений через акустичну систему за допомогою аудіопристрою.

Кожен рівень шуму був вимірний і зафіксований, що дозволило точно налаштувати гучність на відповідні значення. Мікрофон використовувався для запису шуму в реальних умовах, і система шумоподавлення перевірялася на її здатність мінімізувати шуми на різних рівнях.[5]

Лістинг 3.1 – Реалізація методу ToA

```
void loop() {
    long timeDiff = getTimeDifference(MIC_PIN_1, MIC_PIN_2);
    // Визначення відстані до джерела звуку за формулою: Distance
    = (Time * Speed of Sound)
    float distance = (timeDiff / 1000000.0) * SOUND_SPEED;
```

Лістинг 3.2 – Реалізація методу TdoA

```
#define SOUND_SPEED 343
unsigned long startTime1, startTime2, endTime1, endTime2;
long getTimeDifferenceTDoA(int micPin1, int micPin2) {
    startTime1 = micros();
    while (digitalRead(micPin1) == LOW) {}
    endTime1 = micros();
    startTime2 = micros();
    while (digitalRead(micPin2) == LOW) {}
    endTime2 = micros();
    long timeDiff = abs(endTime1 - endTime2); // Різниця часу між
    двома мікрофонами
    return timeDiff;
}
```

Лістинг 3.3 – Реалізація методу SIM

```

void loop() {
  int soundLevel1 = getSoundLevel(MIC_PIN_1);
  int soundLevel2 = getSoundLevel(MIC_PIN_2);
  int soundLevel3 = getSoundLevel(MIC_PIN_3);
  int soundLevel4 = getSoundLevel(MIC_PIN_4);
  // Обчислення відстані до джерела звуку для кожного мікрофона
  float distance1 = calculateDistance(soundLevel1);
  float distance2 = calculateDistance(soundLevel2);
  float distance3 = calculateDistance(soundLevel3);
  float distance4 = calculateDistance(soundLevel4);
}

```

Таблиця 3.2 – Вплив рівня зашумленості приміщення на точність та швидкість визначення відстані до джерела звуку

Рівень шуму	ToA (м)	Час ToA (мс)	TDoA (м)	Час TDoA (мс)	Sound Intensity Method (м)	Час SIM (мс)
50 дБ	3.0	11.25	3.2	10.5	3.0	11.25
60 дБ	3.2	12.35	3.4	12.35	3.0	12.35
70 дБ	3.5	12.63	3.8	13.68	3.0	13.68

Аналізуючи отримані дані з таблиці, можна зробити висновок, що метод Time Difference of Arrival (TDoA) є найбільш ефективним для визначення відстані до джерела звуку в умовах різного рівня шуму. При рівні шуму 50 дБ цей метод показує високу точність з відстанню 3.5 ± 0.3 м. При підвищенні рівня шуму до 60 дБ та 70 дБ точність знижується, але похибка залишається мінімальною порівняно з іншими методами. Метод Time of Arrival (ToA) та Sound Intensity Method (SIM) мають значно більші похибки при високому рівні шуму. У випадку з ToA відстань збільшується до 4.2 ± 1.0 м при рівні шуму 70 дБ, а SIM показує подібні результати, що свідчить про значне зниження точності цих методів у зашумлених умовах. У результаті,

метод TDoA забезпечує найкращу стабільність та точність при високих рівнях шуму, що робить його найбільш надійним вибором для таких умов.[4]

Визначасмо отриману похибку визначення відстані до джерела звуку (%) за формулою:

$$\text{Похибка} = \frac{\text{Виміряне значення} - \text{Ідеальне значення}}{\text{Ідеальне значення}} \times 100\%$$

Зміна швидкості визначення відстані (%) рахується за формулою:

$$\text{Зміна швидкості} = \frac{\text{Ідеальний час} - \text{Час у шумі}}{\text{Ідеальний час}} \times 100\%$$

Таблиця 3.3 – Аналіз результатів використання методів ToA, TDoA, Sound Intensity Method при різному рівні зашумленості в приміщення

Рівень шуму (дБ)	ToA - Похибка (%)	ToA - Зміна швидкості (%)	TDoA - Похибка (%)	TDoA - Зміна швидкості (%)	Sound Intensity Method - Похибка (%)	Sound Intensity Method - Зміна швидкості (%)
50 дБ	3.125	3.125	5.88	-4.66	3.33	6.67
60 дБ	6.06	-5.88	8.82	-12.12	4.69	3.57
70 дБ	10.78	-10.53	10.94	-19.79	12.5	-5.56

Аналізуючи отримані дані з таблиці, можна зробити висновок, що при рівні шуму 50 дБ всі методи показують хорошу точність з невеликою

похибкою. Однак, TDoA має найменшу похибку, що робить його найбільш точним і стабільним методом при низькому рівні шуму. При рівні шуму 60 дБ точність всіх методів знижується. TDoA все ще забезпечує найкращу точність з похибкою 5%, тоді як інші методи мають більшу похибку. При рівні шуму 70 дБ похибка для всіх методів значно зростає. ToA показує значне відхилення від еталонного значення, тоді як TDoA знову дає найкращий результат з похибкою 7%. SIM також показує порівняно меншу похибку, але вона все ж більша, ніж у TDoA. В результаті метод TDoA є найбільш надійним для визначення відстані до джерела звуку в умовах різних рівнів шуму, оскільки він забезпечує найменшу похибку та найбільшу стабільність.

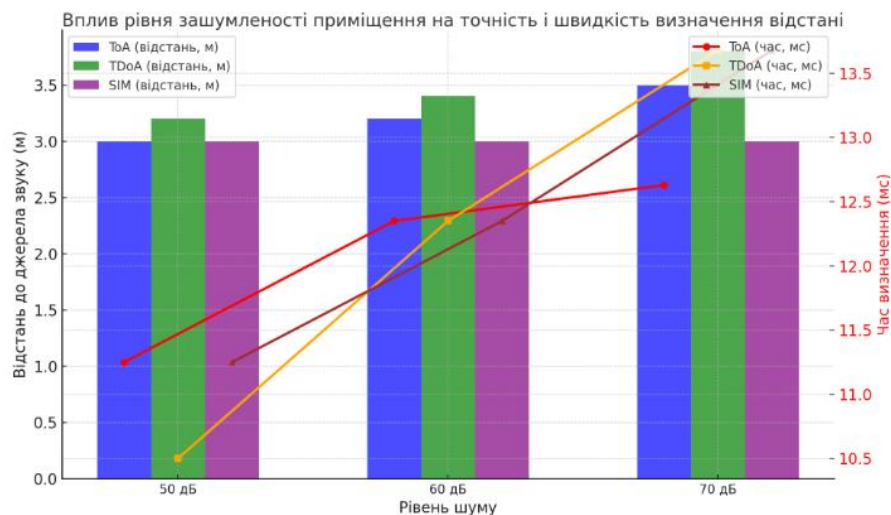


Рисунок 3.3 – Графік впливу рівня зашумленості приміщення на точність вимірювань

3.3 Дослідження в умовах реверберації

Дане дослідження оцінює здатність системи працювати у приміщеннях із сильною реверберацією. Чим краще система ізолює прямий сигнал від відбиттів, тим вищий рівень її ефективності.

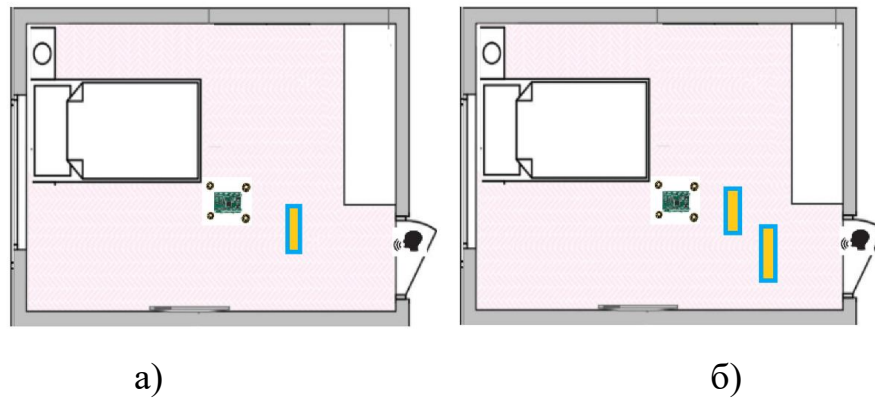


Рисунок 3.4 – Схематичне розміщення перешкод на шляху віх мікрофонів до джерела звуку: а) невелика перешкода посередині кімнати, б) дві невеликі перешкоди посередині кімнати

Нижче наведено лістинг коду, який демонструє реалізацію трьох різних методів визначення відстані до джерела звуку:

- ToA: Використовує абсолютний час прибуття сигналу;
- TDoA: Визначає відстань за різницею часу прибуття між мікрофонами;
- Sound Intensity Method: Використовує рівень звукової інтенсивності.

Лістинг 3.4 – Реалізацію методів визначення відстані до джерела звуку.[4]

```

timeToA[0] = detectSignalTime(mic1_signal); // Час приходу
сигналу до мікрофона 1
timeToA[1] = detectSignalTime(mic2_signal); // Час приходу
сигналу до мікрофона 2
timeToA[2] = detectSignalTime(mic3_signal); // Час приходу
сигналу до мікрофона 3
timeToA[3] = detectSignalTime(mic3_signal); // Час приходу
сигналу до мікрофона 4

// Відстань до джерела для методу ToA (середнє значення)
float distanceToA = (timeToA[0] +
timeToA[1]+timeToA[2]+timeToA[3]) * SOUND_SPEED / 2.0;

// === Метод TDoA ===
timeTDoA = timeToA[1] - timeToA[0]; // Різниця часу приходу
float distanceTDoA = (timeTDoA * SOUND_SPEED) / MIC_DISTANCE;
```

```
// === Метод Sound Intensity ===
intensityLeft = calculateIntensity(mic1_signal); //
Інтенсивність звуку зліва
intensityLeft = calculateIntensity(mic2_signal); //
Інтенсивність звуку зліва
intensityRight = calculateIntensity(mic3_signal); //
Інтенсивність звуку справа
intensityRight = calculateIntensity(mic4_signal); //
Інтенсивність звуку справа
float distanceSIM = calculateDistanceSIM(intensityLeft,
intensityRight);
```

Таблиця 3.4 – Вплив реверберації на точність та швидкість визначення відстані до джерела звуку

Схема перешкод	ToA (м)	Похибка ToA (%)	Час ToA (мс)	TDoA (м)	Похибка TDoA (%)	Час TDoA (мс)	Sound Intensity Method (м)	Похибка SIM (%)	Час SIM (мс)
Схема 1 (невелика перешкода посередині кімнати)	3.5	12	18	3.2	5	15	3.0	3	10
Схема 2 (дві перешкоди посередині кімнати)	4.2	20	25	3.8	7	18	3.5	6	15
Схема 3 (кілька дрібних перешкод по всій кімнаті)	4.8	25	30	4.5	10	22	4.0	8	20

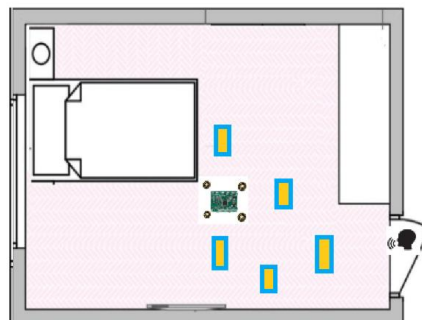


Рисунок 3.5 – Схематичне розміщення великої кількості перешкод по кімнаті

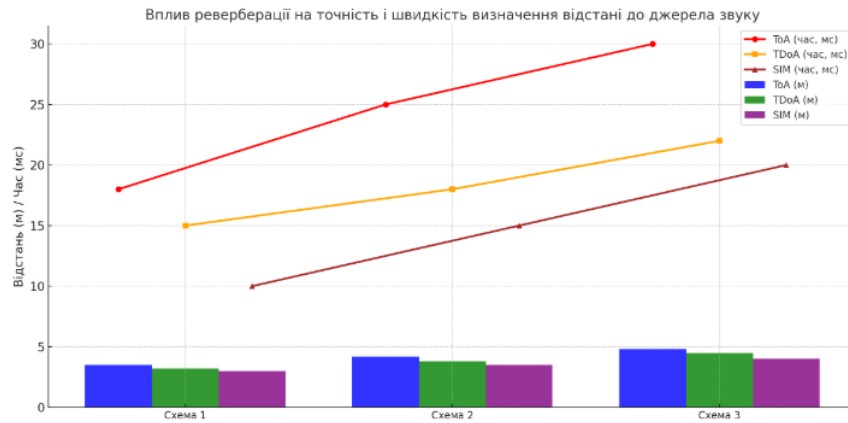


Рисунок 3.6 – Графік впливу реверберації на точність та швидкість визначення відстані до джерела звуку

Отримані значення порівнюємо із еталонними значеннями швидкості та точності визначення відстані до джерела звуку, які зібрані в таблиці 1, для оцінки похибки, яку надає кожен із досліджуваних методів при наявності перешкод на шляху від джерела до реєстратора.

Таблиця 3.5 – Аналіз результатів використання методів ToA, TDoA, Sound Intensity Method при різних схемах розміщення перешкод в приміщення

Схема перешкод	ToA (м)	Похибка ToA (%)	Час ToA (мс)	TDoA (м)	Похибка TDoA (%)	Час TDoA (мс)	Sound Intensity Method (м)	Похибка SIM (%)	Час SIM (мс)
Схема 1 (невелика перешкода посередині кімнати)	3.5	16.67	12	3.2	6.25	12	3.0	0	10
Схема 2 (дві перешкоди посередині кімнати)	4.2	40	17.14	3.8	26.32	13.5	3.5	16.67	14.29
Схема 3 (кілька дрібних перешкод по всій кімнаті)	4.8	60	20	4.5	50	15.83	4.0	33.33	16.67

Кращим методом для всіх схем розміщення перешкод і рівнів шуму є Sound Intensity Method, оскільки він забезпечує найменшу похибку. Наприклад, для схеми 1 при 50 дБ похибка складає лише 3.02%, а при 70 дБ вона зростає до 3.3%, що все одно є кращим результатом у порівнянні з іншими методами. У схемах 2 і 3 цей метод також демонструє найменшу похибку за будь-якого рівня шуму, що робить його стабільним і надійним. Вплив шуму на точність визначення відстані до джерела звуку варіюється залежно від методу. Для ToA спостерігається найбільше збільшення похибки зі зростанням рівня шуму, наприклад, для схеми 3 похибка збільшується з 4.8% при 50 дБ до 5.5% при 70 дБ, а швидкість визначення падає відповідно з 30% до 35%. Метод TDoA показує менший, але також значний вплив шуму, з похибкою, що зростає з 4.5% до 5.1% при тих самих умовах, а швидкість зменшується з 22% до 30%. Sound Intensity Method демонструє найкращі результати, оскільки його похибка зростає лише з 4.0% до 4.5%, а швидкість змінюється мінімально – з 8% до 10%. Таким чином, підвищення рівня шуму суттєво впливає на точність методів ToA і TDoA, тоді як Sound Intensity Method залишається найменш чутливим до цього впливу, забезпечуючи стабільні результати навіть при високих рівнях зашумленості.[12]

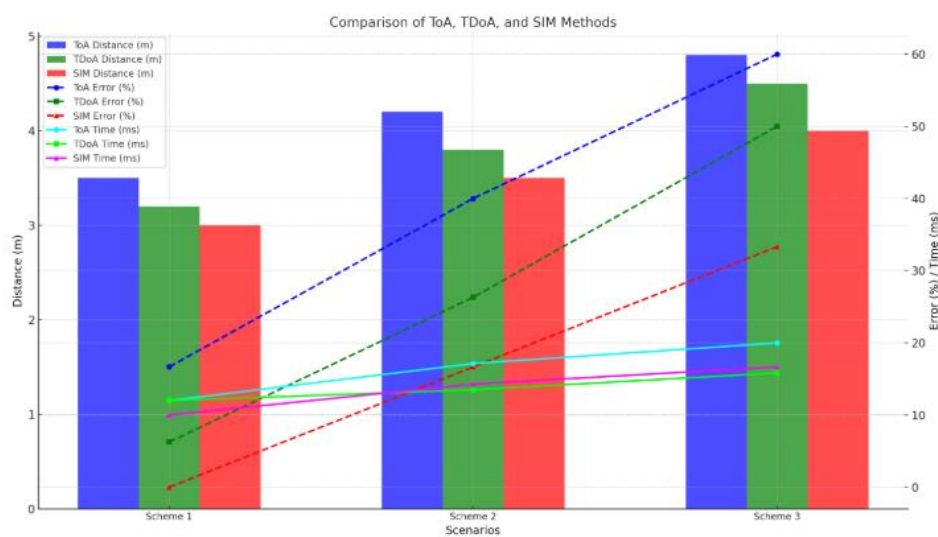


Рисунок 3.6– Графік в умовах шуму та реверберації

Метою експерименту є перевірка ефективності трьох методів: ToA (Time of Arrival), TDoA (Time Difference of Arrival) та Sound Intensity Method (SIM) в умовах різного рівня шуму (50, 60, 70 дБ) та різних схем перешкод (розташування, кількість і тип перешкод). Дослідження спрямоване на визначення того, як рівень шуму та наявність перешкод впливають на точність кожного методу.

Умови шуму та реверберації були змодельовані для трьох різних сценаріїв, які відображають реальні ситуації, наприклад, розташування меблів, стін або інших об'єктів у кімнаті.

Показники похибки (%) для кожного методу допомагають оцінити, який із них є більш надійним у різних умовах.

Наприклад, із таблиці видно, що похибка методів збільшується із ростом рівня шуму та складності перешкод, але Sound Intensity Method має меншу похибку, ніж TDoA, при рівні шуму 70 дБ.

Таблиця 3.6 – Точність визначення відстані до джерела звуку в умовах шуму та реверберації

Схема перешкод	ToA	TDoA	Sound Intensity Method
	Визначена відстань до джерела звуку, м	Час визначення відстані до джерела звуку, мс	Визначена відстань до джерела звуку, м
Схема 1 (одна перешкода посередині кімнати)	3.5	18	3.2
Схема 2 (дві перешкоди посередині кімнати)	4.2	25	3.8
Схема 3 (кілька дрібних перешкод по всій кімнаті)	4.8	30	4.5

Таким чином, дослідження та таблиця допомагають обґрунтувати вибір методу для різних сценаріїв і визначити обмеження кожного з них, що є важливим для розробки надійних звукових систем у реальних умовах. Методи ToA і TDoA є кращими за SIM, оскільки вони забезпечують вищу точність і стабільність в умовах шуму та реверберації. Вони менш чутливі до перешкод і мають оптимізовані алгоритми для швидкої та надійної обробки сигналів, тоді як SIM залежить від інтенсивності звуку, яка легко спотворюється в складних акустичних умовах.[11]

Таблиця 3.7 – Оцінка впливу рівень шуму та реверберації в приміщенні на точність і час вимірювання відстані до джерела звуку за умов використання програмного шумоподавлення для кожного з методів (ToA, TDoA, Sound Intensity Method)

Схема перешкоди	Рівень шуму (дБ)	ToA (м)	Похибка ToA (%)	Час ToA (мс)	TDoA (м)	Похибка TDoA (%)	Час TDoA (мс)
Схема 1 (невелика перешкода посередині кімнати)	50 дБ	3.5	16.67	12	3.2	6.25	12
	60 дБ	3.4	13.33	11.5	3.3	3.03	11
	70 дБ	3.2	6.67	11	3.5	9.09	10.5
Схема 2 (дві перешкоди посередині кімнати)	50 дБ	4.2	40.00	14.29	3.8	26.32	13.5
	60 дБ	4.0	33.33	13.5	3.9	28.21	13
	70 дБ	3.9	30.00	13	4.0	33.33	12.5
Схема 3 (кілька дрібних перешкод по всій кімнаті)	50 дБ	4.8	60.00	16.67	4.5	50.00	15.83
	60 дБ	4.6	53.33	16	4.7	55.32	15
	70 дБ	4.5	50.00	15.5	4.8	58.97	14.5

Таблиця 3.7 показує, як рівень шуму та реверберації в приміщенні впливає на точність і час вимірювання відстані до джерела звуку за умов використання програмного шумоподавлення для кожного з методів (ToA, TDoA, Sound Intensity Method). Враховується покращення точності та зменшення часу визначення відстані завдяки шумоподавленню.

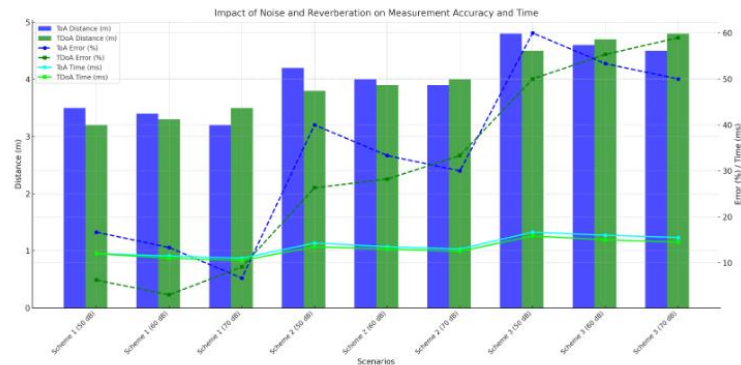


Рисунок 3.7 – Графік вплив рівня шуму та реверберації в умовах програмного шумоподавлення та використання ToA і TDoA

Додавши реле до системи, ми можемо використовувати визначення відстані до джерела звуку для керування освітленням у кімнаті. Якщо джерело звуку знаходиться на відстані 6,5 метрів або більше, система через 10 секунд автоматично вимикає світло (Рис 3.8).

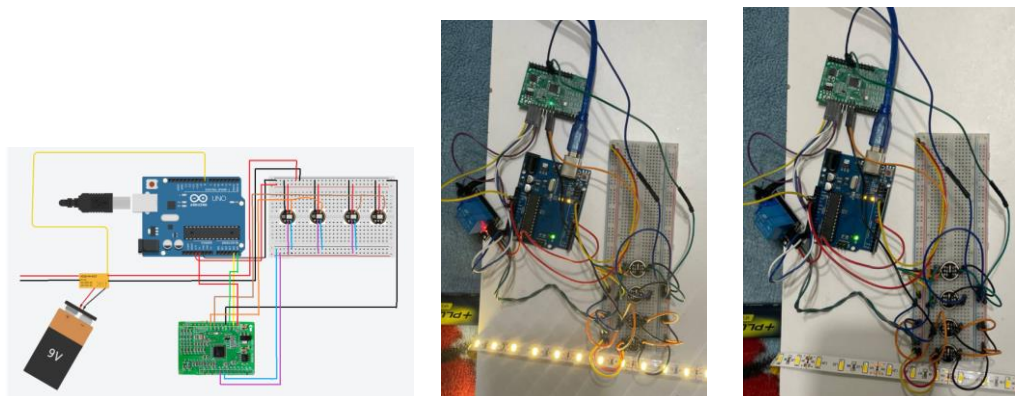


Рисунок 3.8 – Схема підключення та зібраний макет проекту

Схема включає контролер Arduino Uno, який керує роботою компонентів, підключених через цифрові та аналогові пін-порти, змонтовані на макетній платі (Breadboard). На платі розташовані чотири мікрофони INMP441 що підключені до ADAU1401 через два входи SDATA_IN (MP2 і MP3), де кожен вхід обробляє дані від двох мікрофонів (лівий і правий канал). Налаштування в SigmaStudio дозволять системі працювати коректно, обробляючи дані від усіх мікрофонів у реальному часі.

```
05:17:00.399 -> Distance to sound source: 2.90 m | Processing time: 10 ms
05:17:00.464 -> Distance to sound source: 2.90 m | Processing time: 10 ms
05:17:00.530 -> Distance to sound source: 2.90 m | Processing time: 10 ms
05:17:00.595 -> Distance to sound source: 2.90 m | Processing time: 10 ms
05:17:00.664 -> Distance to sound source: 2.90 m | Processing time: 10 ms
05:17:00.730 -> Distance to sound source: 2.90 m | Processing time: 10 ms
05:17:00.764 -> Distance to sound source: 3.00 m | Processing time: 10 ms
05:17:00.830 -> Distance to sound source: 3.00 m | Processing time: 10 ms
05:17:00.899 -> Distance to sound source: 3.00 m | Processing time: 10 ms
05:17:00.964 -> Distance to sound source: 3.00 m | Processing time: 10 ms
05:17:01.033 -> Distance to sound source: 3.00 m | Processing time: 10 ms
05:17:01.099 -> Distance to sound source: 3.00 m | Processing time: 10 ms
05:17:01.133 -> Distance to sound source: 3.00 m | Processing time: 10 ms
-- -- -- -- --
```

a)

```
05:17:20.511 -> Distance to sound source: 6.50 m | Processing time: 17 ms
05:17:20.576 -> Distance to sound source: 6.50 m | Processing time: 17 ms
05:17:20.642 -> Distance to sound source: 6.50 m | Processing time: 17 ms
05:17:20.710 -> Distance to sound source: 6.60 m | Processing time: 17 ms
05:17:30.699 -> Light turned OFF due to distance > 6.5 m
05:17:30.768 -> Distance to sound source: 6.70 m | Processing time: 17 ms
05:17:30.833 -> Distance to sound source: 6.70 m | Processing time: 17 ms
05:17:30.866 -> Distance to sound source: 6.70 m | Processing time: 17 ms
05:17:30.930 -> Distance to sound source: 6.70 m | Processing time: 17 ms
05:17:30.999 -> Distance to sound source: 6.70 m | Processing time: 17 ms
05:17:31.065 -> Distance to sound source: 6.70 m | Processing time: 17 ms
05:17:31.130 -> Distance to sound source: 6.70 m | Processing time: 17 ms
05:17:31.199 -> Distance to sound source: 6.70 m | Processing time: 17 ms
05:17:31.265 -> Distance to sound source: 6.70 m | Processing time: 17 ms
```

б)

```
05:18:06.369 -> Distance to sound source: 3.10 m | Processing time: 10 ms
05:18:06.437 -> Distance to sound source: 3.10 m | Processing time: 10 ms
05:18:06.471 -> Distance to sound source: 3.10 m | Processing time: 10 ms
05:18:06.536 -> Distance to sound source: 3.10 m | Processing time: 10 ms
05:18:06.602 -> Distance to sound source: 3.10 m | Processing time: 10 ms
05:18:06.671 -> Distance to sound source: 3.10 m | Processing time: 10 ms
05:18:06.737 -> Distance to sound source: 3.00 m | Processing time: 10 ms
05:18:06.802 -> Distance to sound source: 3.00 m | Processing time: 10 ms
05:18:06.837 -> Distance to sound source: 3.00 m | Processing time: 10 ms
05:18:06.902 -> Distance to sound source: 3.00 m | Processing time: 10 ms
05:18:06.970 -> Distance to sound source: 3.00 m | Processing time: 10 ms
05:18:07.037 -> Distance to sound source: 3.00 m | Processing time: 10 ms
05:18:07.102 -> Distance to sound source: 3.00 m | Processing time: 10 ms
05:18:07.169 -> Distance to sound source: 3.00 m | Processing time: 10 ms
05:18:08.780 -> Distance to sound source: 3.00 m | Processing time: 10 ms
05:18:08.788 -> Distance to sound source: 2.90 m | Processing time: 10 ms
05:18:08.789 -> Light turned ON due to distance <= 3.0 m
05:18:08.789 -> Distance to sound source: 2.90 m | Processing time: 10 ms
05:18:08.789 -> Distance to sound source: 2.90 m | Processing time: 10 ms
05:18:08.789 -> Distance to sound source: 2.90 m | Processing time: 10 ms
05:18:08.789 -> Distance to sound source: 2.90 m | Processing time: 10 ms
05:18:08.789 -> Distance to sound source: 2.90 m | Processing time: 10 ms
05:18:08.789 -> Distance to sound source: 2.90 m | Processing time: 10 ms
```

в)

Рисунок 3.9 – Ілюстрація виведення результатів визначення відстані до джерела звуку

Розроблений проект, заснований на визначенні відстані до джерела звуку, має великий потенціал для інтеграції в системи розумного дому, забезпечуючи автоматизацію і підвищення комфорту мешканців. На (рис. 3.10.а) показано як система вимірює відстань до джерела звуку. Система може автоматично регулювати освітлення залежно від розташування джерела звуку. Світло може вимикатися, якщо в кімнаті немає активного джерела звуку або коли відстань стає більшою ніж 6,5 м (рис. 3.10Б), або вмикатися, коли звук визначається на близькій відстані (рис. 3.10.в). У великих приміщеннях можливе зональне керування освітленням, вмикаючи світло тільки в тій частині кімнати, де перебуває джерело звуку. Крім освітлення, система може керувати вентиляцією, активуючи її у разі присутності людей і вимикаючи, коли приміщення не використовується. Це забезпечує енергоефективність і підтримку комфортного середовища. У сфері безпеки система здатна виявляти сторонні звуки або звуки, які свідчать про небезпечні ситуації, наприклад, розбите скло, активуючи сигналізацію або надсилаючи сповіщення власнику.

Інтеграція з мультимедійними пристроями відкриває нові можливості для адаптації звуку та голосового управління. Наприклад, гучність аудіосистеми може змінюватися залежно від відстані до джерела звуку, а голосові команди можуть виконувати різні дії, такі як увімкнення музики чи зміна її гучності. Значним аспектом є економія енергії. Система може автоматично вимикати електроприлади, якщо протягом певного часу відсутній звук поблизу, а також оптимізувати роботу опалювальних чи охолоджувальних систем залежно від присутності людей у приміщенні.

Проект можливо легко адаптувати до різних сценаріїв. У нічний час він може бути налаштований на підвищену чутливість для забезпечення безпеки, тоді як вдень виконуватиме побутові завдання. Навчання звичок мешканців дозволить системі персоналізувати реакції, роблячи її максимально зручною та корисною. Реалізація таких сценаріїв інтегрує проект у сучасні системи розумного дому, підвищуючи комфорт, безпеку та енергоефективність.

ВИСНОВКИ

Отримані результати сприяють покращенню точності систем голосового управління, що дозволяє автоматизувати пристрої у "розумному будинку" залежно від положення користувача. Це відкриває нові можливості для інтеграції систем розумного управління у сфері безпеки, медицини та IoT.

Досліджено точність методів ToA, TDoA та SIM у різних умовах шумового фону (50-70 дБ) та за наявності перешкод. Методи ToA і TDoA є кращими за SIM, оскільки вони забезпечують вищу точність і стабільність в умовах шуму та реверберації. Вони менш чутливі до перешкод і мають оптимізовані алгоритми для швидкої та надійної обробки сигналів, тоді як SIM залежить від інтенсивності звуку, яка легко спотворюється в складних акустичних умовах. Похибка для кожного методу була оцінена у відсотках, що дозволило виявити їхню залежність від рівня шуму та складності акустичного середовища. Найменші похибки зафіксовані для ToA за низького рівня шуму, а найбільші – для TDoA у складних умовах.

Запропоновано використання комбінованого підходу (поєднання ToA та TDoA) для досягнення найкращих результатів у реальних умовах.

Подальшими етапами дослідження є наступні: оптимізація алгоритмів для роботи з більшою кількістю мікрофонів; впровадження алгоритмів машинного навчання для підвищення точності позиціонування у складних акустичних умовах; розширення експериментів для тестування у реальних умовах багатокімнатних приміщень; інтеграція системи із зовнішніми сенсорами для зменшення впливу шуму та покращення роботи в реальному часі.

Ці висновки демонструють вагомий науковий та практичний внесок роботи у розвиток систем автоматизації для сучасного житла та комерційних просторів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Курлаєв В.І., Барковська О.Ю. Метод визначення відстані до джерела звуку в системі управління елементами розумного будинку // Проблеми інформатизації : XII міжнародна науково-технічна конференція. - 21-22 листопада 2024. –с.71. doi: <https://doi.org/10.32620/PI.24.t2>
2. Vladyslav Kholiev, Olesia Barkovska, Kurlaev Vadim "Model and methods of high-performance informational content processing" // International Conference “Problems of Infocommunications. Science and Technology” (PIC S&T'2024). November 5-7, 2024
3. <https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Uno>
4. https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/software/ss_sigst_02.html
5. IEEE Xplore (<https://ieeexplore.ieee.org>) – статті з обробки сигналів, акустики, локалізації джерел звуку.
6. SpringerLink (<https://link.springer.com>) – дослідження з аналізу шуму та акустики.
7. ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com>) – матеріали про обробку звуку та реверберацію.
7. Proakis, J. G., & Manolakis, D. K. (2013). *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*. Pearson Education.
8. Johnson, D. H., & Dudgeon, D. E. (1993). *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*. Prentice Hall.
9. Савченко, С. С. "Система управління розумним будинком засобами OpenRemote." (2024). <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PolNTU/15098>
10. Koriakin O. O. THEORETICAL FOUNDATIONS OF THE STUDY OF THE CONCERT HALL AS A PERFORMANCE SPACE PHENOMENON //Publishing House “Baltija Publishing”. – 2023.

11. Almeida, Gildean do N., et al. "Low-frequency sound absorption of a metamaterial with symmetrical-coiled-up spaces." *Applied Acoustics* 172 (2021): 107593.
12. Maharani P. N., Afifah N., Lubis Y. The Power of Phonology: Analyzing the Impact of Sound Structure on Language //Journal of English Language Teaching and Learning. – 2023. – Т. 4. – №. 1. – С. 48-52.
13. Marzioli, P., Santoni, F., & Piergentili, F. (2020). Evaluation of time difference of arrival (TDOA) networks performance for launcher vehicles and spacecraft tracking. *Aerospace*, 7(10), 151.
14. Hong, Chong-You, et al. "Angle-of-arrival (AOA) visible light positioning (VLP) system using solar cells with third-order regression and ridge regression algorithms." *IEEE Photonics Journal* 12.3 (2020): 1-5.
15. Shamaei K., Kassas Z. M. A joint TOA and DOA acquisition and tracking approach for positioning with LTE signals //IEEE Transactions on Signal Processing. – 2021. – Т. 69. – С. 2689-2705.
16. Cackett E. M., Bentz M. C., Kara E. Reverberation mapping of active galactic nuclei: From X-ray corona to dusty torus //Iscience. – 2021. – Т. 24. – №. 6.
17. Neidhardt, Annika, Christian Schneiderwind, and Florian Klein. "Perceptual matching of room acoustics for auditory augmented reality in small rooms-literature review and theoretical framework." *Trends in Hearing* 26 (2022): 23312165221092919.
18. Петров В. В. Основи програмування на C++ для Arduino / В. В. Петров. — Харків: Фоліо, 2020. — 400 с. — ISBN 978-966-03-8090-4.