

информационных системах / С.Ю. Симаранов // Техническая кибернетика, 1989. - №2. - С.128-131.

5. Современная радиолокация (анализ, расчёт и проектирования систем) Пер. с англ. под ред. Ю.Б. Кобзарева. - М.: Советское радио, 1969. - 644 с.

6. Ильчук А.Р. Алгоритмы автоматического радиолокационного сопровождения целей в режиме обзора/ А.Р. Ильчук, А.И. Канащенков, В.И. Меркулов, О.Ф. Самарин, Г.П. Служкин, А.И. Шуклин // Радиотехника, 1999. - № 11. - С. 3-21.

7. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей/ А. Фарина, Ф. Студер - М.: Радио и связь, 1993. - 320 с.

8. Гришин И.Ю. Метод адаптивного управления параметрами режима сопровождения многофункционального радиолокационного комплекса/ И.Ю. Гришин// Искусственный интеллект, 2009. - № 4. - С. 520-524.

9. Проектирование зенитных управляемых ракет: учебник / И.И. Архангельский, П.П. Афанасьев, Е.Г. Боло тов, И.С. Голубев, А.М. Матвеев, В.Я. Мизрохи, В.Н. Новиков, В.Г. Светлов; под ред. И.С. Голубева и В.Г. Светлова. Изд. второе, перераб. и доп. - М: Изд-во МАИ, 2001. - 732 с.

10. Зенитные ракетные комплексы ПВО Сухопутных войск. Часть 1 // Техника и вооружение, 2003. - №6. - С. 29-40.

11. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация/С.З. Кузьмин - Киев: КВЦ, 2000. - 428 с.

12. Гузь В.И. Адаптивное управление распределением энергетического и временного ресурса РЛС с фазированной антенной решеткой/ В.И. Гузь, А.В. Бутырин, В.П. Липатов, Т.В. Барингольц // Радиотехника, 2007. - № 2. - С. 3-14.

13. Этингтон Д.А. Многофункциональные вращающиеся РЛС с электронным сканированием для обзора воздушного пространства / Д. А. Этингтон, П. Дж. Карилас, Дж. Д. Райт // ТИИЭР, 1985. - т. 73, № 2. - С. 199-216.

14. Бартон Д., Варт Г. Справочник по радиолокационным измерениям. Пер. с англ. под ред.М.М. Вейсбейна. - М.: Советское радио, 1976. - 392 с.

15. Бобров Д.Ю., Доброжанский А.П., Зайцев Г.В., Маликов Ю.В., Цыпин И.Б. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных РЛС. Часть 1: Принципы разработки. Преобразование сигнала в цифровую форму // Цифровая обработка сигналов, 2001. - №4. - С. 2-11.

16. Бобров Д.Ю., Доброжанский А.П., Зайцев Г.В., Маликов Ю.В., Цыпин И.Б. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных РЛС. Часть 2: Алгоритмы обработки радиолокационных сигналов // Цифровая обработка сигналов, 2002. - №1. - С. 28-39.

17. Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление. Пер. с англ. под ред.А.С. Шаталова/ Дж. Медич - М.: Энергия, 1973. - 440 с.

18. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах. Под ред. Леондеса К.Т. - М.: Мир, 1980. - 388 с.

19. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. - М.: Наука, 1981. - 270 с.

20. Саврасов Ю.С. Алгоритмы и программы в радиолокации/ Ю.С. Саврасов - М.: Радио и связь, 1985. - 216 с.

21. Зенитные ракетные комплексы ПВО Сухопутных войск. Часть 2 // Техника и вооружение, 2003. - №7. - С. 1-20.

УДК 534.864

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ПРОСТОРОВОСТІ ПРИМІЩЕННЯ

К.т.н. В.В. Усик, Д.С.Зубченко, Національний технічний університет «ХПІ», м.Харків

Запропонована модель виділення обвідної імпульсного відгуку приміщення засобами MATLAB, проведений порівняльний аналіз кривої з обвідної, що отримана в програмному пакеті EASERA.

Предложена модель выделения огибающей импульсного отклика помещения средствами MATLAB и проведен сравнительный анализ кривой с огибающей, полученной в программном пакете EASERA.

The authors proposed a model of allocation of the envelope of the impulse response means premises MATLAB and a comparative analysis of the envelope curve, resulting in a software package EASERA.

**Ключові слова:** акустика приміщень, імпульсний відгук приміщення.

### Введення

Для дослідження акустики приміщень спеціального призначення недостатньо використання тільки частотної залежності часу реверберації, тому використовуються додаткові критерії, що базуються на імпульсній характеристиці приміщення [1].

В статті наведені етапи розробки моделі виділення обвідної сигналу та система оцінювання проведеного експерименту на базі кореляційного аналізу сигналів.

### Метою роботи є:

1) аналіз математичного апарату, що дозволяє від імпульсного відгуку отримати обвідну щільності спаду звукової енергії в приміщенні протягом усього ревербераційного процесу;

2) аналіз програмного забезпечення, що дозволяє отримати досліджувані характеристики експериментально та промоделювати аналітично (за допомогою математичного моделювання);

3) проведення порівняльної характеристики описаних методів.

### Розробка моделі дослідження

Моделювання виконується за допомогою програмного пакету MATLAB та його системи блочного імітаційного моделювання Simulink [2,3].

На рис.1 наведена структурна схема дослідження, яка складається з таких частин: імпульсного відгуку, енергетично-часової залежності, систем виділення обвідної та порівняння сигналів.

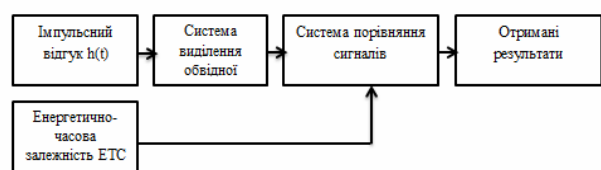


Рис.1. Структурна схема дослідження

Для отримання імпульсного відгуку та енергетично-часової залежності використовується вимірювальна програма EASERA [4-7]. За допомогою налаштувань проведення вимірювання можна отримати імпульсний відгук приміщення на тестовий сигнал. На базі відгуку виконується розрахунок енергетично-часової залежності спаду сигналу з плином часу. Це реалізується вбудованими алгоритмами вимірювальної програми. Отримані результати імпульсного відгуку приміщення та енергетично-часова залежність (ЕЧЗ) зберігаються на дисковому просторі ПК задля подальшої роботи з ними.

Система виділення обвідної сигналу являє собою систему, яка по суті виконує перетворення імпульсного відгуку (ІВ) в ЕЧЗ. Для її створення необхідно мати на увазі, який математичний апарат лежить в основі цього перетворення. Існує декілька способів виділення обвідної сигналу, серед яких найбільш розповсюджені наступні:

- 1) піднесення у квадрат вхідного сигналу та подальшої його низькочастотної фільтрації;
- 2) створення аналітичного сигналу шляхом використання перетворювача Гілберта [8].

В даній роботі розглядається виділення обвідної сигналу за другим способом. Процес його реалізації головним чином базується на створенні аналітичного сигналу, який має комплексний вигляд. Його дійсна частина береться з початкового сигналу, а уявна отримується шляхом дії на початковий сигнал перетворювача Гілберта. Система виділення обвідної побудована за наступним алгоритмом (рис. 2).

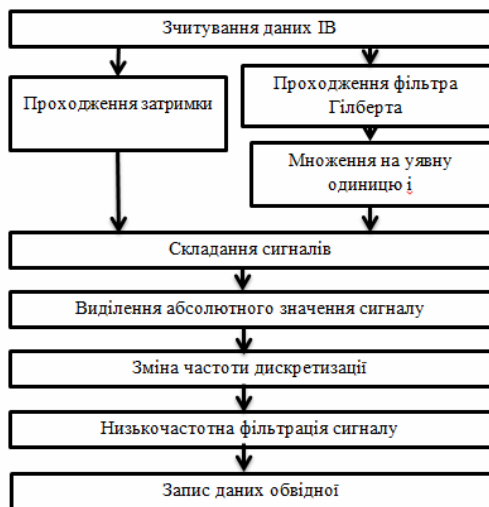


Рис.2. Алгоритм роботи системи виділення обвідної

Першим кроком роботи алгоритму є отримання інформації з файлу, що містить імпульсний відгук приміщення. Зчитані дані стають готовими для подальшої праці з ними. Далі вони мають обробитися фільтром Гілберта, для того щоб можна було отримати квадратурне доповнення сигналу.

$$s_a(t) = s(t) + js_{\text{орг}}(t),$$

$$s_{\text{орг}}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(t')}{t-t'} dt' \quad (1)$$

За формулою (1) аналітичний сигнал є сумою дійсного початкового сигналу та уявного квадратурного доповнення. Цим і обґрунтовується множення на уявну одиницю сигналу, що пройшов перетворення.

Так як сигнал йде через фільтр, він затримується при його проходженні. Для того, щоб початковий сигнал та його квадратурне доповнення співпадали за часом, вводиться затримка початкового сигналу, яка дорівнює половині довжини фільтру. Наступним кроком є складання отриманих сигналів. Надалі необхідно виділити абсолютне значення сигналу задля отримання амплітудної обвідної сигналу. Отриманому сигналу треба змінити частоту дискретизації, бо введення затримки та фільтрація вплинули на те, що початкова частота дискретизації вхідного сигналу буде відрізнятися від частоти вихідного. Це реалізується за допомогою фільтру-проріджувача, який пропускає крізь себе послідовність даних та виділяє кожний заданий за ступенем проріджування відлік.

Для зменшення биття та згладжування обвідної використовується низькочастотна фільтрація, що допомагає позбутися високочастотних складових. Останнім кроком виконання алгоритму є збереження отриманих результатів, щоб мати змогу далі з ними працювати та досліджувати.

Система виділення обвідної реалізується на основі системи імітаційного моделювання Simulink. В засобах MATLAB міститься модель dspenvdet, яка виконує подібну процедуру. За її схемою з урахуванням особливостей вхідного сигналу виконується побудова системи виділення обвідної.

Система порівняння сигналів має на меті дослідити отриманий за допомогою моделювання та вимірний програмним забезпеченням сигнали. Найкращим способом це зробити – знайти коефіцієнти кореляції цих сигналів. Система порівняння сигналів реалізується також за допомогою програмного пакету MATLAB.

За отриманими результатами робляться висновки щодо того, на скільки та чим саме відрізняються сигнали вимірювального програмного забезпечення від тих, які моделюються системою імітаційного моделювання.

### Вимірювання імпульсного відгуку та ЕЧЗ в EASERA

На рис.3. зображений графік імпульсного відгуку аудиторії, який не має спеціального акустичного оздоблення, і використовується в учбових цілях. ЕЧЗ цього приміщення показана на рис.4. Для дослідження використовувався тестовий сигнал з частотою дискретизації (ЧД) 22050 Гц.

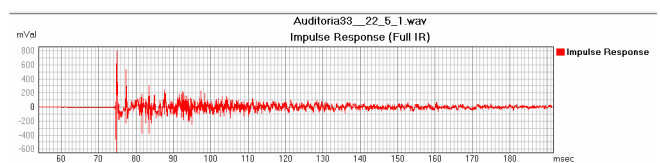


Рис. 3. Результати вимірювання ІВ для аудиторії з ЧД 22,05кГц

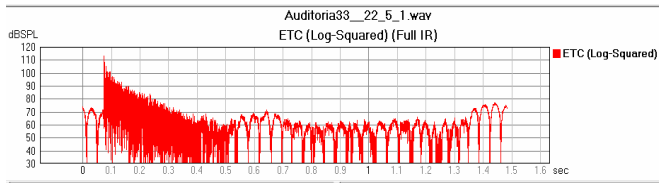


Рис. 4. Результати вимірювання ЕЧЗ для аудиторії з ЧД 22,05 кГц

Якщо використовувати частоту дискретизації тестового сигналу 44100Гц, то для цього ж самого приміщення отримуються трохи інші графіки ІВ (рис. 5) та ЕЧЗ (рис.6).

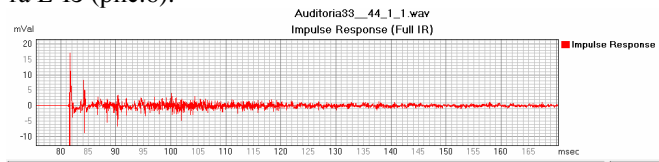


Рис. 5. Результати вимірювання ІВ для аудиторії з ЧД 44,1 кГц

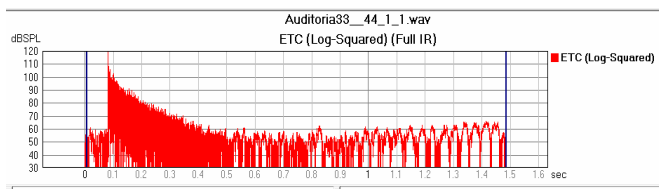


Рис. 6. Результати вимірювання ЕЧЗ для аудиторії з ЧД 44,1 кГц

Аналогічним способом отримуються і інші результати вимірювань. Так для коридору ІВ та ЕЧЗ з ЧД 22,05 кГц зображені на рис. 7 та 8.

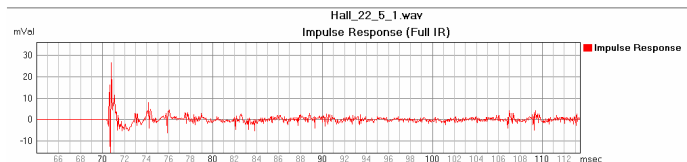


Рис. 7.Результати вимірювання ІВ для коридору з ЧД 22,05 кГц

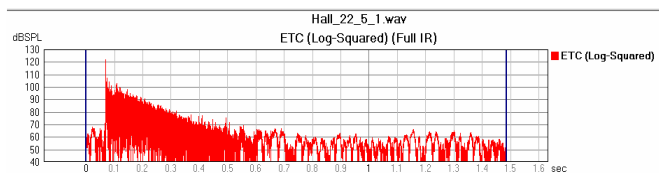


Рис. 8. Результати вимірювання ЕЧЗ для коридору з ЧД 22,05 кГц

Коридор має дерев'яну підлогу, стіни, які зафарбовані світлим кольором, та світлу фарбовану стелю. Для ЧД 44,1 кГц це приміщення має ІВ та ЕЧЗ зображені на рис9 та 10.

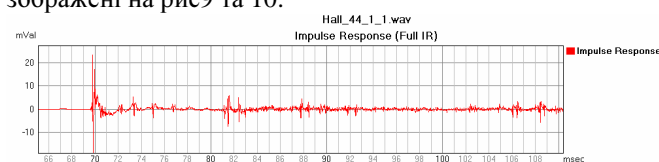


Рис. 9. Результати вимірювання ІВ для коридору з ЧД 44,1 кГц

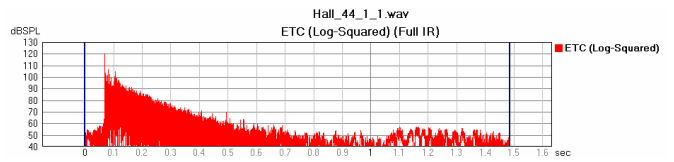


Рис. 10. Результати вимірювання ЕЧЗ для коридору з ЧД 44,1 кГц

Наступним кроком є отримання результатів з акустичної лабораторії, що має спеціальне оздоблення: стіни та стелю, що поглинають звук, покриття підлоги у вигляді ковдри. Для цього приміщення також проводяться виміри ІВ та ЕЧЗ з використанням тестового сигналу з ЧД 22,05 кГц (рис.11 та рис.12), а також з ЧД 44,1 кГц (рис.13 та рис.14).

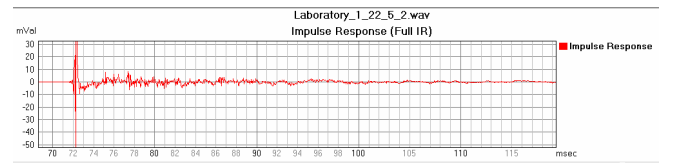


Рис. 11. Результати вимірювання ІВ для лабораторії з ЧД 22,05 кГц

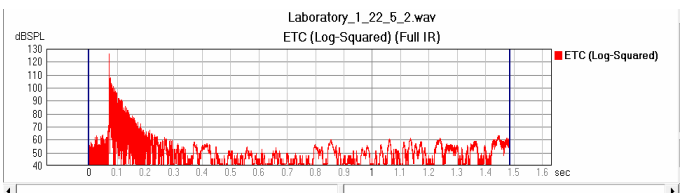


Рис. 12. Результати вимірювання ЕЧЗ для лабораторії з ЧД 22,05 кГц

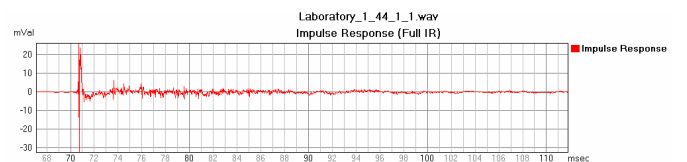


Рис. 13. Результати вимірювання ІВ для лабораторії з ЧД 44,1 кГц

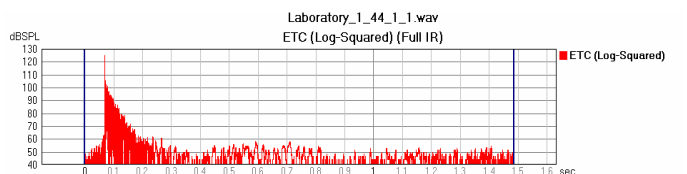


Рис. 14. Результати вимірювання ЕЧЗ для лабораторії з ЧД 44,1 кГц

**Моделювання та аналіз отриманих результатів**

Отримані результати зберігаються у вигляді файлів формату wav. Особливість збереження файлів ЕЧЗ полягає в тому, що програма дозволяє зберігати результат лише в лінійному масштабі, незважаючи на обрані параметри.

Наступним кроком збережені файли завантажуються MATLAB, використовуючи шаблони

насамперед створених файлів «loading\_files.m» та «loading\_files\_ETC.m»:

```
% Loading measurement signal IR
[Y,Fs1,Bits1]=wavread('C:\Measurement\Dasha\Audit
oria33__22_5_1-Impulse Response')
```

```
% Loading measurement signal ETC
[X,Fs2,Bits2]=wavread('C:\Measurement\Dasha\Audi
toria33__22_5_1-Energy-Time Curve')
```

Після завантаження автоматично оновлюються файли «signal\_IR.mat» та «signal\_ETC.mat», які містять зчитану з файлів вимірювань інформацію.

Наступним кроком відкривається створена модель виділення обвідної сигналу (рис. 15). Переглядаються параметри конфігурації, які повинні мати вигляд як на рис. 16.

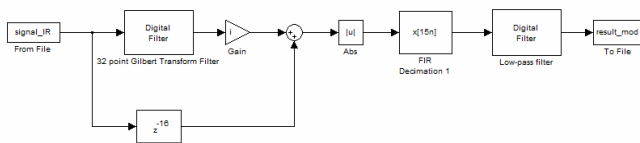


Рис.15. Модель виділення обвідної сигналу

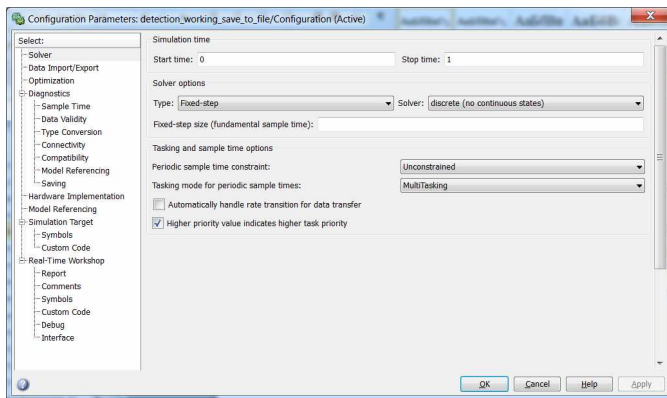


Рис. 16. Параметри конфігурації для вкладки розрахунку Solver

Код модулю порівняння має код:  
 $[CorrCoef]=corr(X,Z)$

```
plot(CorrCoef);
title('Correlation Coefficient')
xlabel('Columns')
ylabel('Correlation Value');
```

Для знаходження середнього значення коефіцієнту кореляції пропонується після виконання коду, коли вже розраховані значення параметру CorrCoef в командній строчці Command Window набрати mean (CorrCoef) – функцію, що повертає середнє значення вектору або матриці.

Тривалість виконання моделювання в одиницях реального часу дорівнює 2 хв 47сек 11мс для сигналів з ЧД 22,05 кГц та 10хв 20сек 58мс для сигналів з ЧД 44,1 кГц.

**Кореляційний аналіз результатів**

На отриманих графіках аналізу сигналів з аудиторії (рис. 17 та рис.18) показані коефіцієнти кореляції. В даному випадку, більше значення коефіцієнтів мають сигнали з ЧД 22,05 кГц, в середньому 0,7236 порівняно з 0,6859.

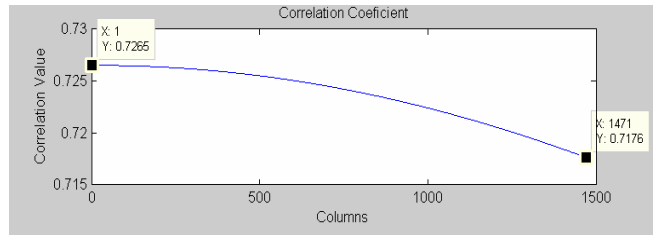


Рис. 17. Результати кореляційного аналізу з аудиторії з ЧД 22,05 кГц

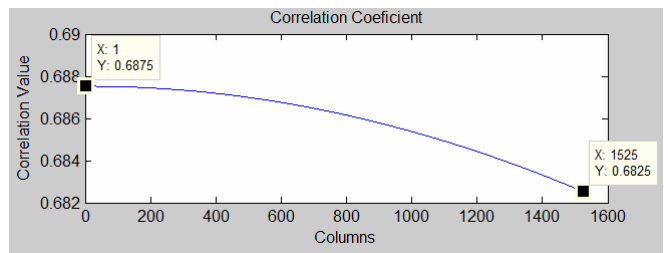


Рис. 18. Результати кореляційного аналізу з аудиторії з ЧД 44,1 кГц

Але сигнали з більшою частотою дискретизації мають перевагу у меншому діапазоні зміни значень коефіцієнтів: відповідно для сигналів з ЧД 22,05 кГц різниця між максимумом та мінімумом є 0,0089, а для сигналів з ЧД 44,1 кГц різниця 0,005. В цілому результати кореляційного аналізу свідчать про досить високий рівень схожості вимірюного та отриманого в результаті досліджень сигналів.

На отриманих графіках кореляції сигналів з коридору (рис. 19 та рис.20) більше значення коефіцієнтів кореляції мають сигнали з ЧД 44,1 кГц, в середньому 0,7337 порівняно з 0,7294. Також сигнали з більшою частотою дискретизації мають перевагу у значно меншому діапазоні зміни значень коефіцієнтів: різниця між максимумом та мінімумом для сигналів з ЧД 44,1 кГц 0,0047, а для сигналів з ЧД 22,05 кГц вона складає 0,0219.

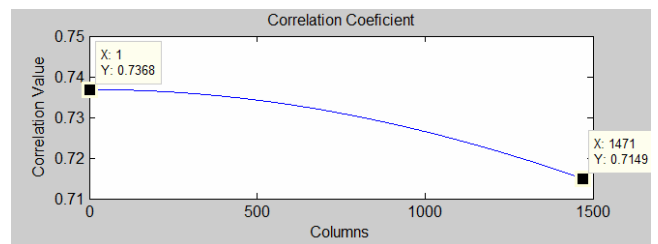


Рис. 19. Результати кореляційного аналізу з коридору з ЧД 22,05 кГц

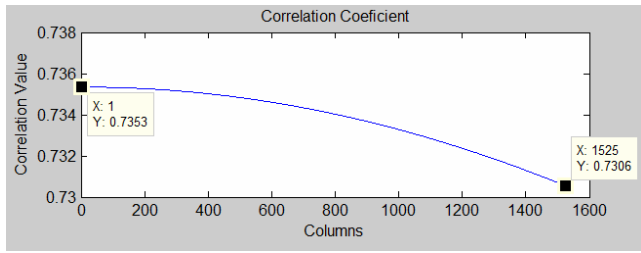


Рис. 20. Результати кореляційного аналізу з коридору з ЧД 44,1 кГц

Для акустичної лабораторії графічні залежності кореляції зображені на рисю.21 для сигналів з ЧД 22,5 кГц та на рис.22 для сигналів з ЧД 44,1 кГц.

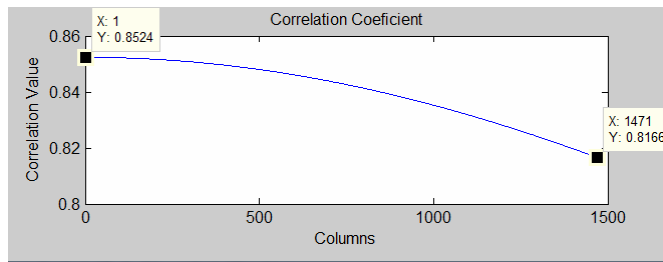


Рис. 21. Результати кореляційного аналізу з лабораторії з ЧД 22,05 кГц

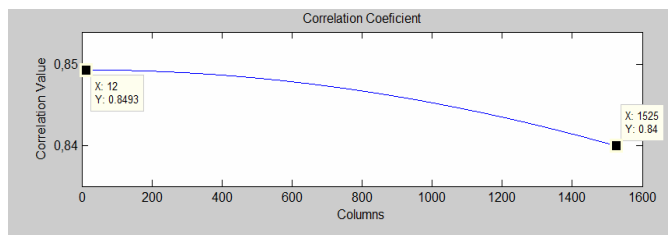


Рис. 22. Результати кореляційного аналізу з лабораторії з ЧД 44,1 кГц

Більше значення коефіцієнтів кореляції мають сигнали з ЧД 44,1 кГц, в середньому 0,8462 порівняно з 0,8402. Також сигнали з більшою частотою дискретизації мають перевагу у значно меншому діапазоні зміни значень коефіцієнтів: різниця між максимумом та мінімумом для сигналів з ЧД 44,1 кГц 0,0092, а для сигналів з ЧД 22,05 кГц вона складає 0,0358.

Таблиця 1

Результати кореляційного аналізу сигналів

Тип приміщення	Частота дискретизації, кГц	Коефіцієнт кореляції		
		мінімум	максимум	середнє
Аудиторія	22,05	0,7176	0,7265	0,7236
	44,1	0,6825	0,6875	0,6859
Коридор	22,05	0,7149	0,7368	0,7294
	44,1	0,7306	0,7353	0,7337
Лабораторія	22,05	0,8166	0,8524	0,8402
	44,1	0,8400	0,8492	0,8462

Для зручності отримані результати досліджень зібрані в табл.1, що містить дані про тип приміщення, частоту дискретизації сигналів, мінімальне, максимальне та середнє значення коефіцієнту кореляції.

**Висновки**

Узагальнюючи отримані результати дослідження можна зробити наступні висновки:

- виконання моделювання для сигналів з ЧД 44,1 кГц майже в 3,7 рази довше, ніж для сигналів з ЧД 22,05 кГц;

- сигнали, які мають більшу частоту дискретизації мають менший діапазон в різниці коефіцієнтів кореляції, що свідчить про кращі результати при вимірюваннях та дослідженнях;

- сигнали мають досить високі коефіцієнти кореляції (від 0,6825 до 0,8492), що дозволяє стверджувати, що сигнали, виміряні програмним забезпеченням, та сигнали, отримані в результаті моделювання, досить близькі за значеннями;

- у приміщенні, яке має спеціальне оздоблення, як наприклад акустична лабораторія, отримуються більш високі результати кореляційного аналізу, ніж у інших приміщеннях, що пов'язано з особливостями його геометрії, більш низьким впливом шуму та оздоблювальними матеріалами.

Таким чином, виміряні програмним забезпеченням EASERA 1.1.3 енергетично-часові залежності спаду сигналу, за якими можна оцінювати акустичну просторовість приміщення, дають високий рівень достовірності отриманих результатів.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:**

1. Звукозапись: акустика помещений / Филип Ньюэлл; пер. с англ. А. Кравченко. - М.: Шоу-Мастер, 2004. – 678с.
2. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов/ А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
3. Акчурин Э.А. "Система компьютерной математики MATLAB": Конспект лекций. – С.: СГУ, 2012. – 150 с.
4. Fundamentals to perform acoustical measurements/ Dr. W. Ahnert, Dr. W. Schmidt//Appendix to EASERA. - 2005. - P. 1-49p.
5. EASERA Users Manual/Dr.W. Ahnert, Dr. W. Schmidt. - 2005. - 212 p.
6. EASERA Tutorial/Dr. W. Ahnert, Dr.W. Schmidt. -2006. – 170 p.
7. EASERA SysTune Software Manual/ Dr. W. Ahnert, Dr.W. Schmidt. -2007. – 142 p.
8. Преобразование Гильберта. Аналитический сигнал// Теория и практика цифровой обработки сигналов. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.dsplib.ru/content/hilbert/hilbert.html>