

СПРИЙНЯТТЯ І АНАЛІЗ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ, РОЗПІЗНАВАННЯ ТИПУ ДЖЕРЕЛА ЗВУКУ, ОЦІНЮВАННЯ НАПРЯМКУ ТА ВІДСТАНІ ДО ДЖЕРЕЛА

Ярема Зелук, Михайло Личак, Олександр Лук'янчук
Інститут космічних досліджень НАН та НАКА України (ІКД НАНУ-НАКАУ)
Проспект Академіка Глушкова, 40, Київ 03680, Україна
Тел.: +380 44 2661291 Факс: +380 44 2664124
adapt@space.is.kiev.ua

ABSTRACT

Ya. Zyelyk, M. Lychak, A. Luckhianchuk.
Perception and analysis of acoustic signals, recognition of sound source type and estimation of a direction and distance to a source. The initial results of researches obtained within the framework of State scientific-technological program "Pattern Computer" are considered. The realistic mathematical models of an acoustic component of the external world are offered. The typical sources of an acoustic noise in aerospace engineering are analyzed. The structure of a receiving acoustic antenna and choice of input-output device of acoustic signals in the computer is justified. The functional purpose of the designed software in MATLAB is described. The results of inputting, analysis and representation in the forms of vector time series, matrices of spectral densities and matrices of spectrograms (matrices of patterns!) of real acoustic sources signals in the room are represented. The technique of estimation of a direction and distance to a sound source is offered and the examples of its application are considered.

ВСТУП

Акустичне поле, збуджуване природними і штучними джерелами, є важливим компонентом зовнішнього світу. Згідно з концепцією Образного комп'ютера (ОК) вимоги щодо підсистеми ОК, пов'язаної з врахуванням та представленням у внутрішніх моделях ОК цього компонента формулюються таким чином. Сприйняття та аналіз акустичних сигналів, розпізнавання типу джерела звуку, оцінювання напрямку та відстані до джерела. Виконання цих вимог у створюваній в ІКД НАНУ-НАКАУ експериментальній системі є предметом цієї статті. У ній відображені результати досліджень, проведених в ІКД НАНУ-НАКАУ за проектом № 15 "Сприйняття та розпізнавання просторових звукових образів джерел акустичних сигналів, імітація (генерація) та активна компенсація акустичних полів", що виконувався в рамках Державної науково-технічної програми "Образний комп'ютер". Автори мають професійний досвід створення та широкого впровадження на протязі понад 20 років цифрових систем реального часу для відтворення акустичних полів.

1. КОНСТРУКТИВНІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ АКУСТИЧНОГО КОМПОНЕНТУ ЗОВНІШНЬОГО СВІТУ

Акустичне поле - це функція координат простору і часу, що характеризує стан суцільного середовища (далі - газу), у якому звук поширюється за допомогою хвиль. При невеликих амплітудах та значних довжинах хвиль поле звуку може бути вичерпним чином описане однією скалярною функцією - тиском, яка задовольняє хвильовому рівнянню. Для отримання розв'язку цього рівняння, який описує конкретну реалізацію хвильового поля, задаються початкові і граничні (разом крайові) умови, і мають справу з крайовими задачами розсіяння звуку. У класичній акустиці для хвильового рівняння ставляться прямі та обернені крайові задачі розсіяння та випромінювання. Найбільш загальна крайова задача характеризується так званими імпедансними граничними умовами. Акустичний імпеданс є величиною, пропорційною відношенню акустичного тиску до його похідної за нормаллю у деякій точці поверхні розсіяння (випромінювання). Імпеданс є об'єктивною характеристикою поверхні тільки для вузького класу крайових задач. Задачі такого класу зводяться до простих схем розсіяння (випромінювання) плоскої хвилі на плоскій поверхні, сферичних хвиль точкового джерела на площині, циліндрі, кулі, тощо. В реальних граничних задачах в загальному випадку акустичний імпеданс поверхні, крім залежності від частоти і акустичних властивостей матеріалу поверхні, залежить ще від координат точки на ній (форми поверхні), кута падіння (при плоскій хвилі), а при довільній формі хвильового фронту є функцією його форми. Таким чином, взагалі акустичний імпеданс як неперервна функція наперед не може бути заданий без проведення дискретних вимірювань. Неможливість задання акустичного імпедансу поверхні особливо проявляється у закритих приміщеннях через багатократні випадкові відбивання хвиль від стінок і те, що ми не в стані передбачити результуючий хвильовий фронт. Отже, при класичному підході хвильові задачі розсіяння і випромінювання в акустиці в загальному випадку практично не можуть бути поставлені через неможливість апріорного

задання граничних умов як неперервних функцій. Тому в загальному випадку хвильові акустичні моделі не можуть бути конструктивними моделями зовнішнього світу при їх представленні у внутрішніх моделях ОК.

Конструктивним шляхом наближеного вирішення хвильових задач акустики в загальному випадку, у тому числі в закритих приміщеннях, може бути відновлення граничних умов і (або) всього шуканого розв'язку (інтерполяція акустичних полів) за даними дискретних вимірювань. Авторами запропонований новий оригінальний підхід до розв'язання задачі відновлення акустичних полів у закритих приміщеннях за даними дискретних вимірювань, який полягає в апроксимації поля відрізком потрібного ряду за системою відомих функцій, коефіцієнти якого знаходяться в результаті вирішення трикритеріальної екстремальної задачі, один з критеріїв якої враховує саме акустичну природу поля і геометрію довільних обмежуючих поверхонь. При розв'язанні екстремальної задачі одержана система лінійних алгебраїчних рівнянь для знаходження коефіцієнтів ряду з матрицею істотно меншої розмірності, ніж розмірність матриці системи, до якої приводило б використання для розв'язування відповідної крайової задачі (з залученням даних вимірювань) скінченнорізницевої методів. До того ж конкретна скінченнорізницева схема справедлива для єдиної реалізації поля, а для інших реалізацій необхідно було б будувати та розв'язувати інші скінченнорізницеві схеми. При відновленні поля запропонованим підходом для іншої реалізації поля слід по-новому вираховувати тільки елементи вектора у правій частині рівнянь, що служить для знаходження коефіцієнтів розкладу поля.

Таким чином, конструктивними математичними моделями акустичного компонента зовнішнього світу можуть бути ті, що базуються на дискретному у просторі представленні поля звуку акустичними сигналами мікрофонів та інтерполяції поля з врахуванням саме акустичної його природи розглянутим вище методом за даними дискретних спостережень.

2. ВИПАДКОВІ АКУСТИЧНІ ПОЛЯ

Реальні акустичні поля найчастіше розглядаються як випадкові і можуть бути описані потенціалом швидкостей $\Phi(\vec{r}, t)$ як випадковою функцією координат і часу. При статистичному підході до задач акустики мова йде про відшукання загальних властивостей ансамблю реалізацій поля, який має місце при статистично заданих умовах. Хвильові рівняння і крайові умови набувають стохастичного характеру, і функції, оператори та параметри, що присутні в них, є випадковими, заданими своїми багатовимірними розподілами ймовірностей. Повний статистичний опис поля може бути здійснений також за допомогою моментів, які є

функціями координат і часу, що вираховуються через багатовимірні функції розподілу шляхом відповідних усереднень за ансамблем реалізацій поля. Для випадкових ергодичних полів вирахування моментів може бути здійснене без знання багатовимірних функцій розподілу випадкового поля (які до того ж ми не в стані оцінити на практиці) шляхом усереднення у часовій або частотній (просторовій чи просторово-частотній області) алгоритмічно-програмними чи апаратними засобами. У більшості розглядуваних задач відтворення і відновлення полів хвильове поле формується в результаті суперпозиції значного числа незалежних парціальних полів. Тому функції розподілу поля можна вважати нормальними, а його опис на рівні перших двох моментів - статистично повним.

Випадкове стаціонарне ергодичне акустичне поле потенціалів швидкостей (тисків) характеризується функцією просторово-часової кореляції

$$R(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \tau) = \overline{\Phi(\vec{r}_1, t) \Phi^*(\vec{r}_2, t + \tau)}, \quad (1)$$

де \vec{r}_1 і \vec{r}_2 радіус-вектори двох довільних точок простору, τ - часовий зсув, риска зверху - усереднення за часом. Для випадкового стаціонарного в широкому сенсі акустичного поля функція (1) є комплексною аналітичною за часовим аргументом τ і припускає такий спектральний розклад:

$$R(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \tau) = \int_0^{\infty} S(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \omega) e^{-j\omega\tau} d\omega \quad (2)$$

$$S(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \tau) e^{j\omega\tau} d\tau. \quad (3)$$

Таким чином, присутня в спектральному розкладі (2), (3) функція спектральної густини $S(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \omega)$ рівною мірою, як і функція просторово-часової кореляції, є вичерпною характеристикою випадкового стаціонарного акустичного поля з нормальними густинами розподілу ймовірностей.

На практиці технічно можливе оцінювання функції просторово-часової кореляції при розгортанні у часі для низки фіксованих точок простору, де знаходяться мікрофони. Таким чином, в контрольних точках акустичне поле можна характеризувати векторним випадковим стаціонарним процесом. Результати оцінювання кореляційних властивостей випадкового стаціонарного акустичного поля в m точках можна представити матрицею просторово-часової кореляції $R = [R_{ij}] (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, m})$ або матрицею спектральних густин спостережуваного в цих точках векторного випадкового процесу $S = [S_{ij}] (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, m})$, де R_{ij} і S_{ij} - оцінені значення функцій (2) і (3) відповідно в точках з координатами \vec{r}_i і \vec{r}_j . Діагональні елементи матриці S (власні спектри) являють собою спектральну густину потужності поля в кожній точці простору, а недіагональні (взаємні спектри)

характеризують просторову кореляцію поля на частоті ω .

3. ПРИЙМАЛЬНА АКУСТИЧНА АНТЕНА ТА ПРИСТРІЙ ВВЕДЕННЯ-ВИВЕДЕННЯ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ

Сенсорними елементами приймальної акустичної антени є конденсаторні мікрофони типу МК 102 (фірми RFT) з чутливістю 50 мВ/па і практично круговою діаграмою спрямованості разом з узгоджувачами підсилювачами Mv 102. Конструкція акустичної антени визначається прийнятим методом оцінювання напрямку та відстані до джерела звуку за допомогою ненапрямлених мікрофонів. В такому випадку необхідно мати мінімум 4 мікрофони, 3 з яких розташовані на одній лінії, а четвертий – не перпендикулярній лінії (всі в одній площині) у тривимірному просторі.

Пристроєм введення-виведення акустичних сигналів в комп'ютер звукова карта DELTA 44 лінії M Audio (корпорація MIDIMAN), яка забезпечує синхронне введення-виведення звукових сигналів чотирма незалежними каналами з частотою перетворення 96000 відліків за сек. і розрядністю 24 біти.

4. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Програмне забезпечення системи сприйняття, аналізу акустичних сигналів та розпізнавання типу джерела звуку розробляється у потужному програмному середовищі MATLAB, який є і мовою програмування водночас. Ліцензійна мережева версія системи MATLAB на 5 клієнтів придбана ІКД НАНУ-НКАУ в авторизованого реселлера HUMUSOFT s.r.o. (Prague, Czech Republic) корпорації The MathWorks, Inc. (Natick, USA). Маючи додаткові колекції проблемно-орієнтованих функцій MATLAB Application Toolboxes, і зокрема, Data Acquisition Toolbox та Signal Processing Toolbox ця система дозволяє при наявності комп'ютера з відповідними характеристиками та звуковою картою здійснювати введення, аналіз, оброблення та синтез звукових сигналів у реальному масштабі часу. Відлагодивши програмно-алгоритмічне забезпечення підсистеми сприйняття, введення та розпізнавання в MATLAB, можна за допомогою Matlab Compiler трансформувати створені програмні модулі у мову C і створити виконувані модулі, незалежні від наявності на деякому іншому комп'ютері MATLAB. При виконанні трансформованих модулів будуть реалізуватися зручні, дружні і багаті графічні інтерфейси, створені засобами MATLAB. Програмне забезпечення складається з основних модулів такого призначення:

- синхронне введення 4-ох звукових сигналів і запис їх в файл;

- циклічна видача на гучномовці записаного векторного звукового сигналу;
- візуалізація часових реалізацій сигналу, спектральних густин;
- проектування і візуалізація цифрових фільтрів;
- оцінювання власних і взаємних спектрів, функції когерентності оцінювання спектрограм;
- оцінювання спектрограм, як часово-частотних образів акустичних сигналів;
- знаходження часу різниці ходу сигналів до мікрофонів для стаціонарних сигналів на основі аналізу фази функції когерентності, максимуму кореляційної функції;
- знаходження моментів часу початку дії акустичних сигналів на мікрофони і вирахування часу різниці ходу сигналів;
- розв'язання геометричної задачі локалізації одного джерела у тривимірному просторі за відомими значеннями часу різниці ходу сигналів до мікрофонів.

5. ОЦІНЮВАННЯ НАПРЯМКУ ТА ВІДСТАНІ ДО ДЖЕРЕЛА

Для розв'язання задачі локалізації джерела звуку у просторі перш за все слід знати час затримок акустичних сигналів, що сприймаються мікрофонами приймальної акустичної антени. В залежності від того, чи є спостережувані за допомогою мікрофонів сигнали стаціонарними, чи нестаціонарними, для визначення часу затримок сигналів при надходженні до мікрофонів, використовуються різні методи. Для стаціонарних акустичних сигналів, незначно спотворених майже некорельованими сигналами, час затримки надходження сигналу до більш віддаленого мікрофона порівняно з менш віддаленим можна визначити або за аргументом максимуму їх взаємної кореляційної функції або за фазою функції когерентності. Однак на практиці при локалізації джерела звуку в достатньо малих приміщеннях навіть для стаціонарних сигналів мають місце значні труднощі. Вони спричинені розподіленістю джерела у просторі, значною реверберацією від різноманітних відбиваючих поверхонь, що породжує значні корельовані шуми, які спотворюють корисні акустичні сигнали. В цьому випадку ефективним виявляється метод локалізації джерела за оцінюванням різниці моментів часу появи імпульсу акустичного сигналу на відповідних мікрофонах приймальної антени після того, як джерело тільки почало випромінювати звук (після "мовчання"). При реалізації такого методу маємо справу з ефектом променевого поширення прямих акустичних хвиль в першу чергу саме від джерела до мікрофонів найкоротшим шляхом, а не від різноманітних відбиваючих поверхонь. Внесок же відбитих внаслідок реверберації хвиль проявляється у прийнятих за допомогою мікрофонів сигналах явно пізніше, ніж мають місце моменти появи імпульсів інформативних сигналів на виходах мікрофонів. Для точного визначення моментів появи імпульсів

акустичних сигналів на мікрофонах розв'язується задача апроксимації фронту імпульсного сигналу лінійною залежністю чи кубічним сплайном за критерієм мінімуму середньоквадратичної похибки на деякому часовому інтервалі, що містить момент початку імпульсу. Сам момент початку оцінюється як значення часового аргументу, при якому відхилення значення апроксимуючої функції від значення сигналу є мінімальним.

На рис.1. зображені часові реалізації акустичних сигналів 4-ох мікрофонів приймальної антени, введених в комп'ютер і візуалізованих. Сигнали збуджені випромінюванням гучномовця, заживленого акустичним сигналом шуму літака АН 70 від звукової карти іншого незалежного комп'ютера.

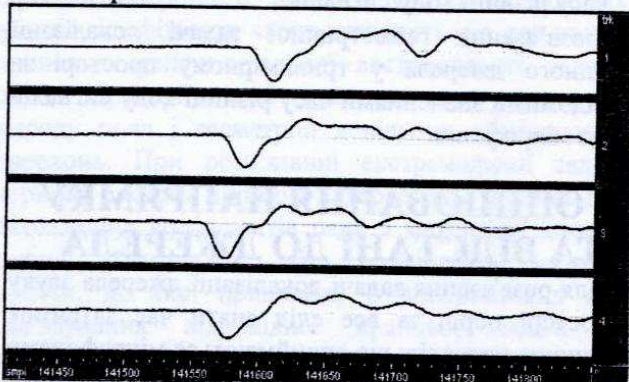


Рис.1. Затримки акустичних сигналів 4-ох мікрофонів після вмикання джерела звуку

На рис. 2 схематично зображена геометрія задачі локалізації в площині одного джерела звуку, що знаходиться в точці S за результатами спостереження акустичних сигналів двома мікрофонами, розміщеними відповідно в точках D_1 і D_2 .

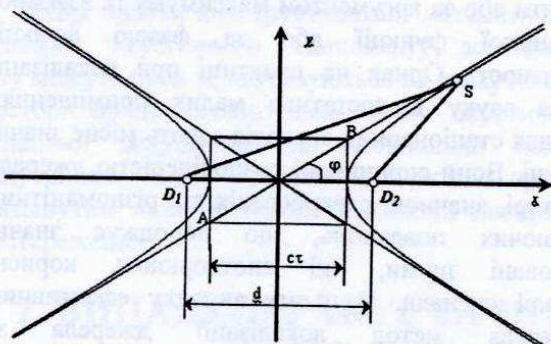


Рис. 2 Локалізація джерела звуку у площині

За відомою швидкістю поширення звуку c та затримкою τ між двома сигналами мікрофонів вираховується величина

$$\Delta d = SD_1 - SD_2 = c\tau \quad (4)$$

Рівняння (4) задає множину точок, що лежать на гіперболічній поверхні обертання відносно осі Ox

Кут напрямку поширення звуку від джерела у фіксованій площині знаходиться як

$$\cos \varphi = \frac{c\tau}{d}$$

Використовуючи 4 мікрофони і зафіксувавши положення приймальної антени відносно осей прямокутної системи координат, знаходимо

координати точки локалізації джерела як точки перетину трьох відповідних гіперболоїдів обертання.

6. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ПРЕДСТАВЛЕННЯ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ОБРАЗІВ

На рис. 3 представлені оцінки 1-ї власної (з 4-ох) та модулів 3-ох взаємних (з 10) спектральних густин 4-ох акустичних сигналів мікрофонів при генеруванні 1-им гучномовцем сигналу шуму літака АН 70.

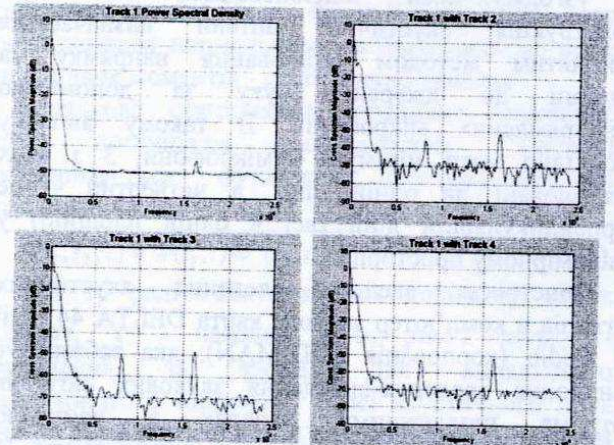


Рис. 3. Спектральні густини 4-ох акустичних сигналів

Спектрограма, відображена на рис. 4, є не графіком, а образом акустичного сигналу 1-го мікрофона, відфільтрованого в діапазоні 20 Hz – 20 KHz, і відображає часово-частотну залежність миттєвого спектру сигналу.

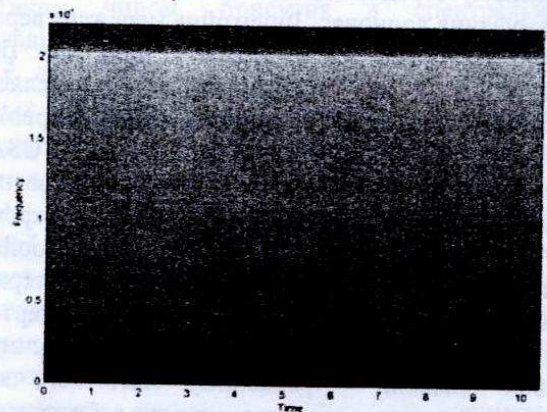


Рис. 4. Спектрограма сигналу 1-го мікрофона

Для 4-ох акустичних сигналів, прийнятих мікрофонами антени, будуються 10 подібних спектрограм (трикутна матриця образів сигналів) – 4 діагональні елементи – образи власних миттєвих спектрів сигналів, а 6 наддіагональних елементів – образи модулів взаємних спектрів сигналів.

ВИСНОВКИ

Розроблена методика оцінювання напрямку та відстані до джерела звуку. Задача розпізнавання типу джерела звуку зведена до задачі розпізнавання матриці образів (спектрограм) акустичних сигналів, прийнятих акустичною антеною.