

УДК 538.311

## МОДЕЛЮВАННЯ ТРИВИМІРНОГО АКУСТИЧНОГО ПОЛЯ У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ ДЛЯ ПЕРСОНАЛЬНОЇ ЗВУКОВІДТВОРЮВАЛЬНОЇ АПАРАТУРИ

Приймаченко О. В., Сєдов С. О.

Зважаючи на сучасний технічний рівень візуалізації тривимірних віртуальних просторів, системи високоякісного звуковідтворення стрімко розвиваються у напрямку створення інтерактивних віртуальних акустичних оточень, які забезпечують необхідне звучання у заданому приміщенні, враховуючи положення і характеристики як джерел звуку, так і слухача. Існуючі системи вирішення цих задач можна розділити на три групи: багатоканальна стереофонія (у тому числі системи *Surround Sound*), бінауральна стереофонія та синтез звукового поля навколо слухача.

Для апаратури «одного слухача» реалізовано багатоканальні системи (*Dolby Mobile*, *SRS CS Headphone*) та бінауральні системи, але обидві не знайшли широкого розповсюдження, оскільки несумісні з більшістю аудіо-записів, що прослуховується на апаратурі даного класу. Системи останньої групи доцільно реалізувати технологією *ауралізації*, тобто відтворення звуку моделюванням *бінаурального* слухового відчуття на заданій позиції змодельованого віртуального простору [1]. Розглянемо можливість створення подібної системи.

### Аналіз існуючих методів та алгоритмів

Слухова інформація, що сприймається людиною, міститься в об'єктивних параметрах (амплітуді, частоті, фазі) звукових коливань, що діють на його барабанні перетинки, суб'єктивні ж оцінки (висота, гучність, тембр) є результатом обробки коливань головним мозком [1]. Якщо розглядати віртуальне приміщення як лінійний фільтр з певними характеристиками, то в кожній точці простору вихідний сигнал є згортокою вхідного сигналу з перехідною характеристикою даного фільтру (приміщення). Розповсюдження звукового імпульсу від джерела звичайно отримують хвильовим рівнянням Гельмгольца, але в деяких випадках його можна визначити іншим способом. З існуючих методів моделювання архітектурної акустики — хвильового, геометричного (променевого) та статистичного — найточніші результати дає хвильовий, наприклад його варіанти *FEM* (*finite element modeling*), *BEM* (*boundary element modeling*), *FDTD* (*finite-difference time-domain*). Однак *FEM* та *BEM* використовують для малих відстаней та низьких частот, оскільки у загальному випадку вони пов'язані з досить громіздкими обчисленнями [2] і тому є неприйнятними для поставленої задачі.

Метод *FDTD* (чисельного розв'язання дискретизованих рівнянь Максвелла) потребує менших обчислень при забезпеченні достатньої точності у

заданих граничних умовах, але їх вибір — складна задача [3]. Існує реалізація *FDTD* для *DSP* (цифрових сигнальних процесорів) — *digital waveguide mesh* [3], яка доцільна при ауралізації сигнальними процесорами. Її недолік — спотворення сигналу через різний час затримки в залежності від нахилу фронту звукової хвилі до поверхні сітки фільтрів обробки сигналів. Нейтралізація цього небажаного ефекту потребує додаткових обчислень. Об'єм обчислень і потужність процесору обмежені, тому використання методу *FDTD* можливе лише у ревербераторі — для пізніх відбиттів.

Статистичний метод моделювання ауралізації не використовують [4].

Методи геометричної акустики [2] доцільні для моделювання раннього та пізнього (>80мс) відбиттів звуку. Об'єми обчислень залежать від параметрів приміщення, кількості можливих варіантів відбиття, розміщення слухача та ін. Окрім простого променевого ray-tracing методу, для обчислення відбитих променів застосовують також метод уявних джерел (*image source*), але відбиття від реального джерела замінюють на промені уявного джерела, що розташоване як дзеркальне відображення основного.

Існують також гібридні алгоритми з розрахунком променів як від основного, так і від уявних джерел. Загалом серед систем ауралізації більшість ранніх відбиттів розраховують методом уявних джерел, однак зі збільшенням об'єму приміщення та варіантів відбиття кількість уявних джерел зростає за експонентою, тому для пізніше відбитих звуків використовують ray-tracing метод [3].

### Побудова моделі ауралізації

Розглянемо проходження звукових променів на простому прикладі, і

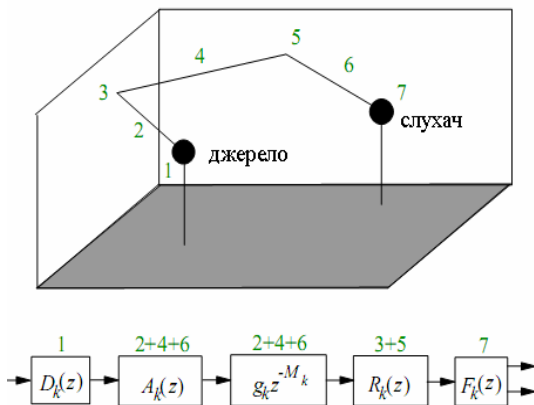


Рис.1

відповідний процес обчислення моделі (рис.1). Для синтезу вихідного сигналу необхідно послідовно розрахувати: параметри випромінюваного джерелом сигналу  $D_k(z)$ ; поглинання звуку повітрям  $A_k(z)$  для відстані  $r = 2+4+6$ ; перетворення променя  $R_k(z)$  при відбитті від перешкод (наприклад, стін) 3 і 5; ослаблення звукового тиску (згідно  $1/r$ ) та затримка звуку  $g_k z^{-M_k}$  для відстані  $r = 2+4+6$ ; дво-канальну модель сприйняття слухача в

даній точці простору, яку визначають значеннями функції *HRTF* — *Head Related Transfer Function*. Тут  $z$  — тривимірний вектор простору,  $M$  — бінарні матриці, що визначають пряму видимість променів від джерел для позиції слухача. У найпростішому випадку перехідна характеристика моделі

$$\underline{H}|_{left, right} = \sum_{i=1}^N \frac{e^{-j\omega t_i}}{ct_i} \cdot \underline{H}_i(\theta, \varphi) \cdot \underline{H}_{i, air} \cdot \underline{HRTF}(\Psi, \nu)|_{left, right} \quad (1)$$

де  $\frac{1}{ct_i}$  – послаблення звукового тиску при розповсюдженні сферичних хвиль;  $H_i(\theta, \varphi)$  – спрямованість джерел у сферичній системі координат, з джерелами у її центрі;  $H_{i,air}$  – ослаблення звукового тиску у повітрі;  $HRTF(\Psi, \nu)$  – функції у сферичній системі координат відносно слухача, враховуючи його орієнтацію у просторі;  $i$  – номери джерел.

Для одного неспрямованого джерела звуку рівняння звукового тиску можна записати як

$$p(\theta, \varphi) = \frac{\rho_0 Q}{32\pi^2 c} \omega^2 \iint |G(\theta, \varphi)|^2 d\Omega, \quad (2)$$

де  $c$  – швидкість звуку в повітрі,  $\rho_0$  – його густина. Для даного джерела звуку значення інтеграла фактору спрямованості  $G(\theta, \varphi)$  дорівнює  $4\pi$ , а інтенсивність звукового потоку  $Q$  постійна в кожній точці фронту.

Рівняння ослаблення у просторі слухача первинного звукового тиску  $p$

$$\underline{p}(r, t) = p e^{-\frac{m}{2}r} e^{j(\omega t - kr)} = p e^{j(\omega t - k'r)}, \quad (3)$$

де  $m$  – енергетичний коефіцієнт ослаблення (що залежить від температури, вологості та інших параметрів повітря),  $\omega$  – кутова частота звуку,  $k = \omega/c$ , а  $k' = \frac{\omega}{c} - j\frac{m}{2}$  – комплексне хвильове число [5].

Для визначення  $HRTF$  простір навколо слухача розбивається на сектори

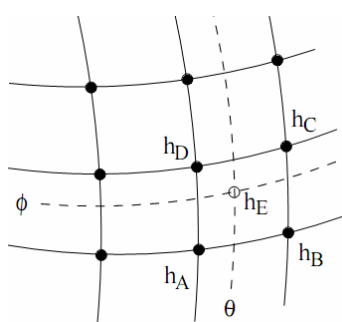


Рис.2

(рис. 2), вузлові точки яких прив'язані до значень з масиву апріорно відомих коефіцієнтів ( $h_A, h_B, h_C, h_D$ ), а у процесі розрахунку беруть найближчу точку до координат входження променя  $h_E(\varphi, \theta)$  в розраховану зону [3]. Розв'язавши відомі диференційні рівняння перехідних характеристик моделі (1) з урахуванням виразів (2) і (3) з нульовими початковими умовами та вхідним сигналом виду  $l(t)$ , матимемо

шуканий результат: вихідний сигнал, згідно визначення, – це згортка вхідного сигналу та  $\underline{H}|_{left, right}$

Структурну схему обчислення визначених процесів показано на рис. 3.

Зі входу сигнал поступає на лінію затримки  $LZ$ , що відповідає відстані до слухача від реального і від усіх уявних джерел з номером  $k = 0; 1; 2 \dots N$ . За один такт сигнали обробляють фільтрами  $T_k$ . Кожен  $T_k$  містить блоки  $D_k(z), A_k(z), g_k z^{-M_k}$  і  $R_k(z)$ , при цьому  $R_k(z)$  не задіяний для обробки прямого звуку. Сигнали, що синтезовані блоками  $T_k$ , поступають на фільтри з параметрами моделі слухача  $F_k(z)$ , які створюють бінауральну орієнтацію в просторі. До обробленого сигналу додається вихідний сигнал з ревербератора  $Rev$ , що синтезує пізні відбиття.

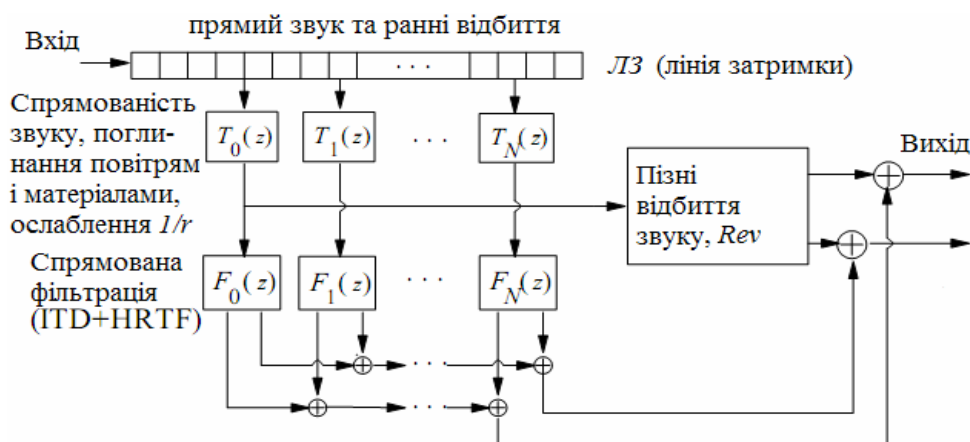


Рис. 3

Проблема розрахунку відбиття звуку від різних матеріалів досить складна, і загального розв'язку для різних матеріалів з урахуванням усіх аспектів не знайдено. Однак, зважаючи на цільовий клас апаратури, можна обмежитись заданням декількох готових приміщень для прослуховування (наприклад, відомих концертних залів).

На відміну від ранніх відбиттів, пізнє відбиття ( $> 80\text{мс}$ ) не моделюють попроменево. Імітацію реверберації забезпечують рекурсивними структурами цифрових фільтрів, параметри яких відповідають акустичним характеристикам обраного віртуального простору [6].

Крім розробки та оптимізації основних алгоритмів, важливим залишається визначення параметрів, необхідних для створення обраного віртуального простору, тобто його геометричних характеристик, матеріалів покриття, координат місцезнаходження та орієнтацію кожного джерела звуку, також і координат місцезнаходження та розміщення слухача у просторі. Останні дві групи параметрів часто не обчислюються апріорно при наявності зворотного зв'язку, який визначає координати слухача та положення його голови у просторі. У цьому випадку методом уявних джерел перераховують такі параметри [7]: координати та орієнтацію джерел у просторі відносно слухача (у сферичній системі координат); коефіцієнти фільтрів, що відтворюють відбиття звуку від перешкод (стін, підлоги, стелі та ін.).

Таким чином, при зміні положення слухача або джерел у просторі система ауралізації має адаптивно змінювати свої параметри, причому – досить швидко, щоб уникнути «стрибків» звуку та інших спотворень. Разом з цим потрібно уникати надлишкових обчислень. Наприклад, при зміні координат та орієнтації у просторі слухача або джерел звуку перераховують всі динамічні параметри, а при повороті голови слухача – тільки функції *HRTF*. Це дає можливість збільшити частоту адаптації системи. Згідно [8] частота має бути не менш ніж 10 Гц, а в [3] рекомендовано частоту 20 Гц.

Згідно з характеристиками сучасних сигнальних процесорів [9,10] можливе створення не тільки мобільної системи ауралізації, що відповідатиме

всім вище визначеним вимогам, а й реалізація низького споживання енергії при досить низькій собівартості отриманого модуля.

На основі обраної моделі ауралізації можливе створення системи моделювання тривимірного акустичного поля за допомогою сучасних сигнальних процесорів для вбудови її у портативні пристрої персонального звуковідтворення. Перспективою розвитку в даному напрямку може бути розробка модуля з системою зворотнього зв'язку (відслідковування положення голови слухача) для портативної звуковідтворюючої апаратури.

#### Література

1. Алдошина И.А.. Основы психоакустики: Теория. Ч.10. Аурализация - виртуальный звуковой мир. // Звукорежиссер. - 2000. - №7. - С. 28-33.
2. Pietrzyk A.. Computer modeling of sound field in small rooms. // Proc. AES 15<sup>th</sup> Int. Conf. on Audio, Acoustics of Small Spaces. - Copengagen, 31 Oct. - 2 Nov. 1998. - p. 24-31.
3. Savioja L. Modeling Techniques for Virtual Acoustics. // Doctorate thesis. - Helsinki: University of Technology. - 2000. - 88 p.
4. Smith J. Physical modeling using digital waveguides. // Computer Music J. - 1992 Winter. - №16(4). - p. 74-87.
5. Bass H., Bauer H. Atmospheric absorption of sound: Analytical expressions. // J. Acoust. Soc. Am. - 1972. - № 52(3). - p. 821-825.
6. Gardner W.. Reverberation Algorithms. // Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics. - Boston: Kluwer Academic. - 1997. - p. 85-131.
7. Vörländer M.. Auralization. Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality. - Berlin: Springer. - 2007. - 335 p.
8. Sandvad J.. Dynamic aspects of auditory virtual environments. - In the 100th AES Convention, preprint no. 4226. - Copengagen: Denmark. - 11-14 May, 1996.
9. Пантелейчук А.. Цифровые сигнальные процессоры: Основы выбора. // Компоненты и технологии. - 2007. - № 9. с. 23-25.
10. Bier J. Choosing a Processor: Benchmarks and Beyond (S043). - Berkeley, California: Berkeley Design Technology, Inc. - USA, 2006.

*Приймаченко О. В., Седов С. О. Моделювання тривимірного акустичного поля у режимі реального часу для персональної звуковідтворювальної апаратури. На підставі аналізу відомих методів та алгоритмів реалізації моделювання віртуального акустичного поля обрано модель ауралізації для портативної апаратури персонального звуковідтворення на базі сучасних сигнальних процесорів.*

**Ключові слова:** акустика, звуковідтворення, стереофонія

*Приймаченко А. В., Седов С. О. Моделирование трехмерного акустического поля в режиме реального времени для персональной звуковоспроизводимой аппаратуры. На основании анализа известных методов и алгоритмов реализации систем моделирования трехмерного акустического поля выбрана модель аурализации для портативной аппаратуры персонального звуковоспроизведения на базе современных сигнальных процессоров*

**Ключевые слова:** акустика, звуковоспроизведение, стереофония

*Sedov S., Pryjmachenko A. Modeling of a three-dimensional acoustic field in a mode of real time for personal of the sound reproduced equipment. Based on the analysis of a known methods and algorithms for the realization of three-dimensional modeling systems of acoustic field auralization system of personal portable audio equipment is chosen. Oriented to the use of modern signal processors.*

**Key words:** acoustics, sound reproduced equipment, stereophone