

А. О. Зуєв, О. М. Євсеєнко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

МЕТОД СТВОРЕННЯ ЗВУКОВОГО ОТОЧЕННЯ В ІМІТАЦІЙНО-ТРЕНАЖЕРНИХ КОМПЛЕКСАХ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Анотація. У статті розглянуто метод створення звукового оточення в імітаційно-тренажерних комплексах з урахуванням дистанції до спостерігача та внеску окремого звукового фрагменту. **Метою** статті є аналіз та оптимізація процесу вибору звукових фрагментів, що програються у процесі моделювання звукового оточення. Проведено аналіз існуючих програмних рішень та математичних моделей, що застосовуються у тренажерних комплексах та системах віртуальної реальності. Наведено алгоритм з використанням схеми резервування та функціональну залежність для оцінювання необхідності програвання фрагменту в залежності від його відстані до спостерігача. Розглянуто питання практичної реалізації методу. За **результатами** дослідження визначено, що запропонована функція оцінювання, забезпечує зменшення кількості фрагментів, що одночасно програються при одночасному збільшенні сумарного внеску чутних спостерігачем фрагментів.

Ключові слова: симуляція, імітаційно-тренажерний комплекс, звукове оточення, обробка звуку.

Вступ

Розвиток науки і техніки вплинув на появу нових видів транспортних засобів, зокрема й техніки спеціального призначення. Одночасно значно зросла їх складність та збільшилися вимоги до якості керування ними, що в свою чергу потребує якісного підвищення рівня підготовки операторів цієї техніки. Навчання персоналу із застосуванням класичних методів навчання (різноманітні інструкції, наочні посібники, плакати, відеофільми, макети, що демонструють один або декілька аспектів експлуатації чи використання техніки) є неефективним, а безпосередньо на техніці є витратним і не завжди можливе у достатньому обсязі [1-2]. Одночасно, робота недостатньо підготовлених операторів може призвести до виходу з ладу різних вузлів та агрегатів і, відповідно, коштовного ремонту, і навіть до трагічних наслідків, що загрожують життю людей.

Деякі види транспортних засобів спеціального призначення використовуються в екстремальних та позаштатних ситуаціях, тому повноцінна підготовка операторів до роботи у разі безпосереднього використання реальної техніки або неможлива, або вкрай ускладнена. Ці два аспекти – вартість та якість, на яку впливає "реалістичність" тренування, а також урахування умов безпеки курсантів, визначають потреби в якісному та одночасно дешевому навчанні навичкам управління складною технікою і як наслідок необхідність дослідження альтернативних варіантів навчання, без безпосереднього використання техніки.

Таким засобом є імітаційно-тренажерні комплекси (ІТК), що використовують комп'ютерний синтез навколишнього середовища у процесі навчання [3]. Вони позбавлені недоліків традиційних засобів навчання, мають невисоку вартість як самого комплексу, так і його експлуатації, безпечні для людини й теоретично дозволяють моделювати будь-які ситуації, що виникають при експлуатації техніки [4]. Найважливішою складовою будь-якого ІТК, є аудіо-візуальна складова процесу навчання. Саме вона дає змогу донести до майбутнього оператора принципи

керування транспортним засобом, дозволяє оперативно реагувати на різні ситуації, що виникають у процесі експлуатації техніки, відображає результати його дій, що робить можливим проведення контролю процесу навчання.

1. Огляд існуючих технічних рішень

Роботи в галузі створення та вдосконалення комп'ютерних систем та методів ІТК мають велике значення: створення нових, досконаліших ІТК дозволяє підвищити якість навчання операторів одночасно знизивши його вартість. Істотним обмеженням комп'ютерного синтезу позакабінної обстановки ІТК досі є недостатня реалістичність як візуальної, так і звукової частини моделювання. Методи та алгоритми що відносяться до візуальної частини систем моделювання ІТК досліджуються науковцями [5-7] вже протягом багатьох років. Цьому також сприяє значний розвиток індустрії розваг, у тому числі і комп'ютерних ігор. Алгоритми та методи візуалізації, які застосовуються в них, практично повністю ідентичні таким, що використовуються в системах візуалізації ІТК [8-9]. Але звукова частина все ще опрацьована недостатньо.

У роботах [10, 11] наведено методи синтезу звуків двигуна автомобіля з використанням суміщення та змішування заздалегідь заготовлених звукових фрагментів з урахуванням швидкості обертання двигуна. Такий підхід до моделювання може бути застосований і в ІТК, але фактично тільки для моделювання внутрішньокабінної обстановки або як локальна частина системи звукового моделювання, тому що вимагає значних обчислювальних ресурсів для синтезу звукового середовища. У статті [12] також описано алгоритм синтезу звуку двигуна автомобіля з урахуванням його частоти обертання, але наведений метод можна використовувати у системах, що працюють у реальному масштабі часу. Однак, як і в попередніх роботах, не розглянуто питання оптимізації та роботи звукової підсистеми в цілому. У роботі [13] застосовано підхід до синтезу звуків, пов'язаний з використанням таблиць звукових фрагментів, з урахуванням швидкості обертання різних

частин автівки. Проблеми пов'язані з оптимізацією комплексного відтворення звукового оточення в процесі моделювання в цій роботі не розглянуті, фрагменти відтворюються за допомогою звукових API та комерційних бібліотек для рендерінгу звуків (наприклад, FMOD). У роботах [14, 15] описано досить цікаві методи синтезу звуків навколишнього середовища (вогонь, вітер, дощ) з використанням системи частинок, а також наведено процедурні моделі для синтезу звуків, за рахунок використання яких досягається додаткова різноманітність та варіативність відчуття звукового оточення.

У роботах [16, 17] розглянуто методи визначення та трасування звукових шляхів за допомогою перевірки взаємної видимості поверхонь об'єктів з використанням різних спеціалізованих структур даних, які можна застосувати для побудови аудіосистеми, що працює в реальному масштабі часу. У статтях [18, 19] наведена система рендерінгу звуку в реальному масштабі часу, яка поєднує повну симуляцію невеликого приміщення та багатоканальний бінауральний синтез акустичного "зображення". Система може бути використана для моделювання приміщення будь-якої форми.

У проаналізованих роботах розглядаються питання відтворення та синтезу локалізованих у невеличкому просторі звуків, або спеціальні дослідження пов'язані з перевіркою шляхів поширення звуків для синтезу ефектів реверберації. Проблема вибору звукових фрагментів, що відтворюються, і мінімізація їх кількості, в розглянутих роботах не розглянута.

Метою статті є оптимізація процесу відтворення звукових фрагментів у системі моделювання акустичного оточення імітаційно-тренажерних комплексів спеціальної техніки. Розглянуто вирішення цього завдання з урахуванням особливостей таких систем моделювання – наявність великої кількості короткочасних звуків, що одночасно відтворюються, і можливості вільного переміщення спостерігача в просторі моделювання.

2. Визначення внеску звукового фрагмента щодо спостерігача

Всі звукові фрагменти в системі моделювання ІТК можна розділити на позакабінні та внутрішньо-кабінні звуки. Кількість внутрішньо-кабінних звуків з одного боку обмежена, так як спостерігач може чути звуки лише з кабіни одного єдиного транспортного засобу. З іншого боку, такі звуки найважливіші для процесу навчання і добре локалізовані у просторі, тому немає сенсу їх якимось чином обмежувати. Зовсім інакша ситуація зі звуками позакабінної обстановки, для яких ключовими відмінностями є:

1) кількість звуків що потрібно відтворювати одночасно – відносно велика, та може сягати 100 і навіть 1000 фрагментів;

2) різні види звуків (двигуни, природні звуки, мовлення, спеціальні ефекти) потребують різних умов виведення і мають різну важливість;

3) необхідність брати до уваги швидкість поширення звукової хвилі, та можливість переміщення спостерігача у просторі.

З урахуванням програмно-апаратних обмежень на кількість звуків, що можуть бути відтворені одночасно, особливу проблему становлять звуки спеціальних ефектів, які мають наступні особливості:

1) велика гучність і, як наслідок, дистанція чутності, тому фактично можна вважати що такі звуки не мають локалізації у просторі;

2) непередбачувано велика кількість звуків, що виникають одночасно або з невеликою перервою, яка за тривалістю не дає звільнитися черзі звуків що відтворюються;

3) необхідність просторової обробки, врахування відстані та напряму до спостерігача, що веде до значного споживання обчислювальних ресурсів.

Звуки спецефектів недоцільно перервати, оскільки вони мають відносно коротку тривалість (1-3 секунди). Також, через невелику тривалість для них не має сенсу робити плавне згасання гучності. Ці звуки мають велику гучність, що в більшості випадків експоненційно зменшується, і тому потрібен ще один звуковий канал для плавного згасання, інакше будуть чутні клацання та тріск, при миттєвому перериванні звукового фрагменту.

Звуки цієї групи неможливо відсортувати та вибрати найбільш пріоритетні, оскільки звукове оточення динамічно змінюється і немає накопичення звукових фрагментів за якийсь відчутний період (1 секунда та більше), як для звуків з інших груп (фонів, мовлення, двигунів, та ін.). Затримувати звуки цієї групи для накопичення недоцільно, тому що, зазвичай, є наочний, помітний візуальний ефект до якого вони відносяться, і будь-яка затримка викликає тиме дисонанс і розсинхронізацію звукової та візуальної складової у системі моделювання ІТК.

3. Метод вибору звукових фрагментів, що програються, з урахуванням резервування

Джерела спецефектів і пов'язані з ними звуки, мають довільний порядок виникнення, тому більш віддалені звуки, що з'явилися в момент t_0 , можуть вичерпати вільне місце у черзі звукових фрагментів – для ближчих звуків, що з'являються в момент $t_1 = t_0 + dt$, не буде вільного місця, і, як наслідок, вони не відтворюються. Для того, щоб у черзі залишалося вільне місце для більш відчутних звуків, потрібно додати резервування за наступним алгоритмом, який включає такі кроки:

1) Розділити всі звуки на групи за їх характером та параметрами відтворення, для кожної групи виділити незалежну кількість фрагментів P_{max} , що відтворюються одночасно та залежно від пріоритетності групи.

2) Для кожної групи:

- відсікати новий звук, якщо у безпосередній близькості (менше за 1-2 м) вже програється звук із цієї ж групи;

- відсікати звук, якщо відстань до спостерігача $d > d_{max}$, перевищує максимальну відстань відтворення встановлену для групи;

- розрахувати коефіцієнт завантаження групи a , :

$$a = P/P_{max}, \quad (1)$$

де P – кількість звуків, що відтворюються зараз, P_{max} – кількість фрагментів, що можуть незалежно відтворюватися в межах групи.

3) Поки $a < a_0$, менше деякої межі $0 < a_0 \leq 1$, для відтворення звуку обирається вільний фрагмент і він починає програватися.

4) Інакше визначається необхідність відтворення звуку:

- якщо $a = 1$, то всі фрагменти у черзі зайняті, немає можливості програти звук;

- якщо $a < 1$, та звук розташований на відстані ближче ніж d_0 до спостерігача, тобто $d < d_0$, де d відстань до спостерігача, в цьому випадку, звук завжди відтворюється;

- інакше, для того щоб визначити, чи потрібно відтворити звук, потрібно перевірити додаткові умови, з урахуванням резервування фрагментів у черзі, за якими звук відсікається.

4. Визначення необхідності відтворення звукового фрагмента

Визначимо коефіцієнт відтворення:

$$a_k = \frac{a - a_0}{1 - a_0}. \quad (2)$$

Умови, за якими звук відсікається, визначимо як $d_k < a_k$, де d_k буде пропорційним відносній відстані від спостерігача до позиції звука[^]

$$d_k = (1 - d_1)^2, \quad (3)$$

де $d_1 = \frac{d - d_0}{d_{max} - d_0}$ – відносна відстань, $d_0 \ll d_{max}$.

Таким чином, наведений алгоритм дозволяє зарезервувати місце в черзі звукових фрагментів, для важливих (найбільш чутних) звуків, якщо черга заповнена більш ніж на $100a_0$ відсотків.

5. Експериментальне дослідження розробленого методу

Проведено порівняльне тестування для запропонованого методу з резервуванням і методу з вибором звуку для програвання без резервування. Оцінку проведено за допомогою функції чутності F_h , з урахуванням відстані від i -го джерела звуку до спостерігача d_i :

$$F_h = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N f(d_i), \quad (4)$$

де $d_i = e^{-\frac{d_i}{10}}$.

Підраховується сума гучностей всіх N звуків, які програватися (загальний внесок) за період (приблизно 400 секунд) з інтервалом в 1 секунду. Оцінка проводиться виходячи з припущення, що найбільш ефективним є той метод, для якого значення оцінної функції F_h буде більшим – спостерігач чути переважно звуки з великим внеском по гучності. При цьому, очікувано, що для більш ефективного методу кількість звуків, що програватися, за період часу буде меншою, за рахунок відкидання звуків, які мають незначний внесок.

Випробування було проведено при симуляції з участю понад 100 активних об'єктів, що безперервно взаємодіють. Спостерігач переміщався у просторі

моделювання таким чином, щоб досягалося близьке до максимального заповнення черги звукових фрагментів, що програються, таким чином імітувалася ситуація, коли за технічними обмеженнями неможливо програти всі звуки які має чути спостерігач. На рис. 1 показана залежність внеску всіх чутних для спостерігача звуків, з урахуванням відстані для методу без резервування та запропонованого методу з резервуванням.

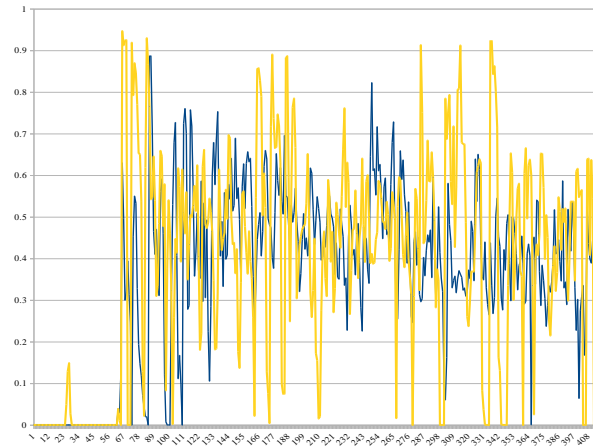


Рис. 1. Залежність внеску всіх чутних спостерігачем звуків з урахуванням відстані: синій – для методу без резервування, померанчевий – для запропонованого методу з резервуванням; по осі абсцис – час з початку моделювання в секундах

На рис. 2 наведені залежності внеску всіх чутних звуків, нормовані щодо кількості звуків, що одночасно програються.

За розглянутий період часу, метод з резервуванням відтворює в середньому в 2 рази менше звуків (для наведеного прикладу це 902, проти 1884 для методу без резервування). При цьому сумарний внесок по гучності для запропонованого методу з резервуванням на 9.5% більше, ніж для методу без резервування (162 проти 148).

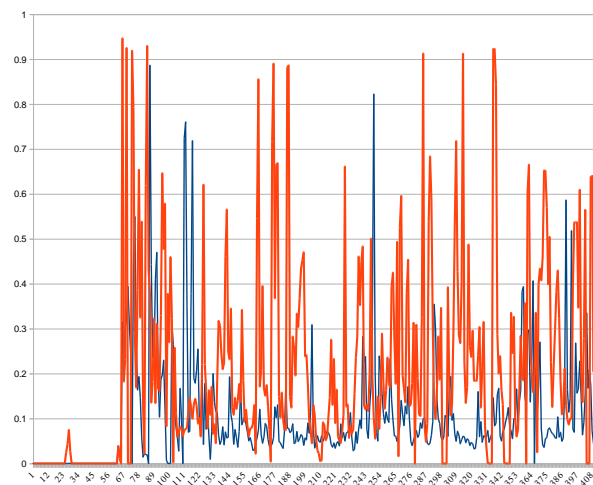


Рис. 2. Залежність внеску для всіх чутних спостерігачем звуків, нормована за кількістю звуків що програються одночасно: синій – для методу без резервування, червоний – для наведеного методу і з резервуванням; по осі абсцис – час з початку моделювання в секундах

Висновки

За результатами дослідження запропонованого методу, можна зробити такі висновки:

- 1) Запропонований метод вимагає в середньому у 2 рази менше ресурсів для обробки звукових фрагментів.
- 2) Сумарний внесок чутних спостерігачем звуків стає на 10 % більше.
- 3) Програмна реалізація методу не вимагає значних змін у структурі підсистеми обробки звуків та

її додавання до ІТК не веде до збільшення обчислювальних ресурсів необхідних для обробки звукового потоку.

Запропонований метод дозволяє значно знизити навантаження з розрахунку та обробки звукових фрагментів на обчислювальну систему, а також знизити різні шуми та артефакти, що виникають при змішуванні великої кількості звукових фрагментів, що програвються одночасно, за рахунок виключення тих звуків, які вносять найменший внесок у звукову картину.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Українські тренажери: теорія і практика // Defence Express. 2010. №1/2. С. 32–52.
2. K.Yao and S.Huang. Simulation Technology and Analysis of Military Simulation Training// Kai Yao and Shaoluo Huang, J. Phys.: Conf. Ser. 2021.**doi: 10.1088/1742-6596/1746/1/012020**
3. Page, E. H. and Smith R. (1998). "Introduction to military training simulation: a guide for Discrete Event Simulationists", Winter Simulation Conference (WSC'98), USA.
4. Бусяк Ю.М., Васильченко О.Г. Побудова структур даних обміну інформацією між підсистемами тренажерів транспортних засобів // Вісн. Нац.техн. ун-ту «ХПІ». Харків, 2002. № 9, т.7: Автоматика та приладобудування. С. 27–30.
5. Larsen M., Gruendell F. A Visual Systems Display for Full-Mission Flight Simulator Training // Presented at the IMAGE VII Conference. Tucson, Arisona, 1994.
6. Pharr M., Green S. Ambient occlusion // GPU Gems: Programming Techniques, Tips and Tricks for Real-Time Graphics. Addison-Wesley Professional, 2004. P. 279–292.
7. Mittring M. Finding Next Gen: Cryengine 2 // SIGGRAPH '07: ACM SIGGRAPH 2007 courses: Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference, San Diego, August 5–9, 2007: Proc.. New York, 2007. P. 97–121.
8. Sennersten C. and Lindley C. (2009). "An Investigation of Visual Attention in FPS Computer Gameplay", VS-GAMES'09: Games and Virtual Worlds for Serious Applications, March 23–24, Coventry, UK.
9. Spruill M. (2010). Technical Evaluation Report, NATO Modelling & Simulation Group MSG-078 Workshop on Exploiting Commercial Games and Technology for Military Use 8th Workshop, Sept. 2009, NATO Report RTO-MP-MSG-078.
10. D. Miljkovic, "Sample based synthesis of car engine noise," in 2020 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), pp. 1012–1017, Sep. 2020. **doi: 10.23919/mipro48935.2020.9245323**
11. F.Chen, X. Zhang. Synthesising the sound of a car engine based on envelope decomposition and overlap smoothing. Journal of Vibroengineering. August 2021, Vol. 23, Issue 5. pp.1254-1266. **doi:10.21595/jve.2021.21920**
12. J.Jagla, J.Maillard, N.Martin. Sample-based engine noise synthesis using an enhanced pitch-synchronous overlap-And-Add method// November 2012. The Journal of the Acoustical Society of America 132(5):3098-108. **doi:10.1121/1.4754663**
13. David A. Heitbrink, Steve Cable. Design of a Driving Simulation Sound Engine// DSC 2007. September 2007.
14. C.Verron, G.Drettakis. Procedural audio modeling for particle-based environmental effects. 133rd AES Convention, Oct 2012, San Francisco, United States. 2012.
15. Y. Dobashi, T. Yamamoto, and T. Nishita, "Real-time rendering of aerodynamic sound using sound textures based on computational fluid dynamics," ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH 2003), vol. 22, no. 3, pp. 732–740, 2003. **doi:10.1145/882262.882339**
16. F. Antonacci, M. Foco, A. Sarti, and S. Tubaro. Real time modeling of acoustic propagation in complex environments. Proceedings of 7th International Conference on Digital Audio Effects, pages 274–279, 2004.
17. A.Chandak, C.Lauterbach, M.Taylor, Z.Ren, D.Manocha. Ad-frustum: Adaptive frustum tracing for interactive sound propagation. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 14(6):1707–1722, 2008. **doi: 10.1109/TVCG.2008.111**
18. N.Raghuvanshi, J.Snyder, R.Mehra, M.C. Lin, N.K. Govindaraju. Precomputed wave simulation for real-time sound propagation of dynamic sources in complex scenes. ACM Transactions on Graphics (proceedings of SIGGRAPH 2010), 29(3), July 2010. **doi: 10.1145/1833349.1778805**
19. Tobias Lentz, Dirk Schroder, Michael Vorlander, and Ingo Assenmacher. Virtual reality system with integrated sound field simulation and reproduction. EURASIP J. Appl. Signal Process., 2007(1):187, 2007. **doi: 10.1155/2007/70540**

Received (Надійшла) 14.02.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.04.2023

Method of creating a sound environment in simulation-training complexes of special vehicles

A. O. Zuev, O. M. Yevseienko

Abstract. A method of creating a sound environment in simulation-training complexes, taking into account the distance to the observer and the contribution of a separate sound fragment is considered. The **purpose** of the article is the analysis and optimization the process of selecting sound fragments that are played in the process of modeling the sound environment. An analysis of existing software solutions and mathematical models used in training complexes and virtual reality systems was carried out. An algorithm using a reservation scheme and a functional dependency for evaluating the decision to play a fragment depending on its distance to the observer is given. The issue of practical implementation of the method is considered. According to the **results** of the study, was determined that the proposed evaluation function provides a reduction in the number of the simultaneous played fragments while at one time increasing the total contribution of the fragments heard by the observer.

Keywords: simulation, simulation-training complex, sound environment, sound processing.