

Акустика на виртуалните обучителни пространства: симулации и ИИ-базирани звукови среди

Павел Стефанов

Acoustics of Virtual Learning Spaces: Simulations and AI-Based Sound Environments

Pavel Stefanov

Abstract:

This article focuses on the acoustic aspects of virtual learning environments. Acoustics and sound perception are essential components of the educational experience and, consequently, play a vital role in the digital transformation of education. Although virtual and augmented reality are traditionally perceived primarily as visual technologies, the sound environment is of immense importance for spatial orientation, attention, cognitive load, and the sense of presence. This research proposes an interdisciplinary framework that combines acoustic simulation modeling, spatial audio, and AI-based adaptation of sound environments. Methods such as ray tracing, image-source models, room impulse responses, binaural reproduction, and generative sound design are examined. The article analyzes the possibilities for interactivity, practical applications in education, benefits and challenges, as well as future trends in the development of intelligent audio environments.

Keywords: virtual reality, acoustics, auralization, spatial audio, artificial intelligence, training simulations, cognitive load, sound design.

For contacts: Proff. Pavel Stefanov, National Academy of Music “Proff, Pancho Vladigerov” – Sofia; pavel_stfnv@mail.bg

ВЪВЕДЕНИЕ

Дигиталната трансформация на образованието доведе до ускорено навлизане на виртуални, разширени и смесени реалности в учебния процес. Виртуалните лаборатории, симулационните тренажори, дистанционните учебни среди и метавселените за обучение все по-често се разглеждат като алтернатива или допълнение към физическата класна стая. В тези среди вниманието обичайно се насочва към визуалния реализъм, графичната детайлност и интерактивността на обектите. Звуковият слой обаче често остава вторичен и недооценен, въпреки че човешкото възприятие на пространството е мултисетивно и силно зависимо от слухови сигнали.

Класическата теория на мултимедийното учене на Ричард Майер подчертава, че обучението се основава на селектиране, организиране и интегриране на вербална и визуална информация с предходни знания; това поставя звука и речта не като декоративен слой, а като равноправна част от когнитивната архитектура на учебния процес. [6] В същата посока теорията за когнитивното натоварване на Суелър разглежда работната памет като ограничен ресурс, който трябва да бъде защитен от излишни, несъществени стимули. [7] От тази гледна точка добре проектираната звукова среда може да подпомага ученето, а лошо проектираната — да го затруднява.

Виртуалната акустика има потенциала да превърне дигиталната среда от статичен визуален модел в преживяване, което се усеща като пространствено, динамично и смислово насочено. Пространственият слух позволява локализиране на източници, ориентация в средата и изграждане на усещане за присъствие;

класическите трудове на Йенс Блаурт върху психоакустиката (психофизика на слуховата локализация) остават основна отправна точка за съвременните технологии за бинаурално и пространствено аудио. [5]

ИЗЛОЖЕНИЕ

В професионалните аудио среди виртуалното акустично моделиране е известно под името „аурализация“. Извън специализирани области като музика, акустика и тонрежисура терминът „аурализация“ често не се използва директно, а по-често се срещат понятия като immersive audio, spatial audio, virtual soundscape, auditory simulation, sonification, audio cues in VR или multisensory learning environments. Изкуственият интелект и акустичното моделиране могат да бъдат интегрирани във виртуални обучителни пространства, така че звуковата среда да не бъде просто фон, а активен педагогически инструмент.

Звукът има няколко функции във виртуалната образователна среда. Преди всичко той ориентира обучаемия в пространството. След това насочва вниманието към събития, обекти и действия. Една от най-силните черти на звука е възможността на създава емоционален и ситуационен контекст. И освен всичко друго звукът може да намалява или увеличава когнитивното натоварване в зависимост от начина на проектиране.

В реалното пространство човек постоянно използва акустични явления при създаване на своето звуково преживяване. Възприятие за посока на звука, закъснение между двете уши, честотни разлики, отражения от стени, реверберация и отношение между директен и отразен звук са в основата на персоналното аурално битие. Във виртуална среда тези физически признаци трябва да бъдат симулирани. Всички звукови събития, отговарящи на реални такива, конкретните вектори, адекватността на акустичната среда и т.н. трябва да отговарят на визуалните параметри на средата.

Това налага интердисциплинарен подход, включващ най-малко две сфери - акустично инженерство и педагогически дизайн. От акустична гледна точка е необходимо да се моделират отражения, поглъщане, разсейване и импулсна характеристика на помещението. От педагогическа гледна точка е важно звуковите сигнали да бъдат смислово подчинени на учебната задача. Звукът не трябва да бъде добавен само за реализъм, а трябва да подпомага разбиране, действие и памет. (Без да се задълбочаваме може да се посочи основателна аналогия със звука за игри и подходите при оформяне на гейминг аудио).

Именно затова аурализацията може да се разглежда като част от теорията за мултимедийното учене. Когато аудиоинформацията е синхронизирана с визуалното действие, тя може съществено да подпомогне интегрирането на знания. Когато обаче звукът се намира в дисонанс или конфликт с педагогическата парадигма, той може да увеличи външното когнитивно натоварване. Изследванията върху immersive VR показват, че когнитивното натоварване, присъствието, кибернеразположението¹¹ и учебните резултати са взаимосвързани фактори, които трябва да се отчитат при реално обучение с VR. [9]

¹¹ Кибернеразположение - състояние на гадене, замайване и дезориентация, породено от сетивно несъответствие (разстройване на сетивата) при работа и пребиваване във виртуална среда

Актуално състояние на виртуалните и AI-базирани звукови симулации

Съвременната виртуална акустика се развива в няколко направления. Първото е *физически базираното моделиране на помещения и траектории на звукови вълни*. При него се използват методи като ray tracing, image-source method, wave-based simulation и хибридни модели. Ray tracing проследява векторите на звукови лъчи между източник, повърхности и слушател. Image-source методът моделира отраженията като виртуални източници. Импулсната характеристика на помещение описва как дадено пространство реагира на кратък звуков импулс и служи като основа за симулация на реверберация, ранни отражения и пространствена яснота. Съвременните практики и разбирания за процесите в пространствената акустика се основават на класическите трудове на Кутруф, Сабин, Лео Беранек, Юрген Майер и др.

Второто направление е *пространственото аудио*. Тук се използват бинаурално възпроизвеждане, HRTF функции, Ambisonics, object-based audio и динамично проследяване на позицията на главата. Целта е звукът да се възприема като разположен в триизмерно пространство, а не като идващ от слушалки или говорители. Технологии като HRTF и Ambisonics се използват за прецизно позициониране на звук във виртуални среди и представляват най-популярните начини за изграждане на звукова среда във виртуална и разширена реалност. [9]

Третото направление е *ИИ-базираното аудио*. То включва машинно обучение за предсказване на акустични параметри, генеративни модели за звуков дизайн, автоматично адаптиране на звукови сцени, класификация на контекст и персонализация спрямо потребителя. Нови разработки от 2025 г. показват движение към по-отворени рамки за пространствено аудио изследване, например GSound-SIR, представен като open-source рамка, която предоставя достъп до междинни ray-tracing данни за пространствено аудио. [10] Паралелно с това генеративни AI системи като SnapSound се насочват към улесняване на звуковия дизайн за неспециалисти чрез автоматизиран избор, синхронизация и интеграция на звуци. [11]

В по-широк план генеративната виртуална реалност се развива към динамични среди, които използват ИИ за създаване на съдържание, мултимодално взаимодействие и контекстуална адаптация, вместо да разчитат само на предварително програмирани сценарии. [13] Това е особено важно за образованието, защото учебните ситуации често изискват промяна според темпа, поведението и нуждите на обучаемия.

Методологична рамка за акустично моделиране

Предложеният модел за ИИ-базирана аурализация за обучителни пространства може да бъде разгледан в четири слоя.

1. Геометричен и материален слой

Първият слой описва виртуалното пространство: форма на помещението, размери, материали, отвори, прегради и обекти. Това отразява съществуващите акустични и пространствени различия между помещения с различно качество и предназначение - виртуална аудитория, лаборатория по химия, симулационен център за медицинско обучение, концертна зала, звукозаписно студио за поп

музика и т.н. В този слой се задават коефициенти на поглъщане и разсейване на материалите, качества и характеристики на граничните повърхности. Това позволява обучаемият не само да вижда пространството, но и да го „чува“ като физически убедително.

2. Акустичен симулационен слой

Вторият слой изчислява акустичната реакция на средата и поведението на звука вътре. Тук се използват ray tracing за ранни и късни отражения, image-source method за първични отражения и импулсни характеристики за възпроизвеждане на реалистична реверберация. Съвременни изследвания върху хибридно акустично моделиране комбинират ray tracing и реверберационни мрежи, за да постигнат правдоподобна симулация на реверберация в различни сценарии. [12]

Ключови параметри са:

- RT60 — времето, за което звукът затихва с 60 dB;
- EDT — ранно време на затихване;
- C50 и C80 — показатели за яснота на реч и музика;
- директен звук — първият звук, достигащ направо от източника до слушателя;
- ранни отражения — отраженията, които формират усещането за размер, форма и качества на пространството;
- късна реверберация — акустичната „опашка“, която създава пространствена атмосфера.

В учебен контекст тези параметри не са само технически. Например високата разбираемост на речта е критична при виртуална лекция, докато по-дълга и по-богата реверберация почти винаги е полезна при обучение по музика, архитектура или сценични изкуства.

3. Интерактивен слой

Третият слой отчита действията на потребителя. Когато обучаемият се движи, завърта глава, приближава се към източник или взаимодейства с обект, звуковата сцена трябва да реагира в реално време. При използване на слушалки с head tracking системата променя бинауралното възпроизвеждане според ориентацията на главата. Стремехът е към постигане на висока реалистичност – при обръщане на главата наляво звукът вече не трябва да остава „закотвен“ към слушалките и да се мести с движението, а да запази позицията си във виртуалното пространство по отношение на промяната на главата.

Интерактивността притежава голям педагогически потенциал, който може да се използва при всяко обучение, където звукови обекти и стимули трябва да се интерпретират и адресират от страна на обучаемите. Примери могат да се посочат във всички направления - при медицински тренажор звуците от апаратура, дишане, пулс и аларми трябва да се възприемат ясно и пространствено точно; при акустично обучение пространствените параметри на звука са от решаващо значение за качеството на работата и звуковия резултат. Възможностите в този вектор са наистина неизчерпаеми и без преувеличение може да се направи аналогия с гениалните творци в изкуството. Например в музиката на Бах се съдържа подобен безкраен потенциал, за който самият автор си дава много добре сметка. „Бах е знаел, че има още неоткрити, неизследвани възможности. В музиката му, както знаем, има много скрити и неизследвани досега явления...“ [3]

4. ИИ адаптационен слой

Четвъртият слой въвежда ИИ. Той анализира контекста и променя звуковата среда според учебната цел и поведението на обучаемия. Възможният ИИ модел включва:

- класификатор на учебен контекст — лекция, тренировка, експеримент, изпитване;
- модул за оценка на поведение — движение, време за реакция, грешки, повторения;
- модул за персонализация — предпочитания, чувствителност към шум, ниво на опит;
- генератор на аудио параметри — сила, реверберация, пространствено разположение, честотен баланс;
- система за обратна връзка — звукови подсказки, предупреждения, насочващи сигнали.

Така звуковата среда може да се променя динамично и интерактивно. Ако обучаемият се затруднява, системата може да намали фоновия шум и да подчертае важни звуци. Ако задачата изисква реалистичен стрес, например при авиационна или медицинска симулация, системата може постепенно да увеличи акустичната сложност, но без да надвишава педагогически допустими граници.

Принос към обучителния процес

Основният принос на акустично интелигентните виртуални среди е в подобряването на качеството на учебното преживяване. Това може да се прояви в няколко посоки.

Първо, пространственото аудио подпомага ориентацията. Обучаемият не само вижда къде се намира даден обект, но и го локализира слухово. Това е особено важно при задачи, които изискват бързо реагиране, навигация или работа в сложна среда.

Второ, детайлната виртуална акустика развива способността на реакция и интеграция на мултисензорна информация като допълнително умение за промяна на фокуса на вниманието. Кратки звукови сигнали, промени в тембъра или пространствено позиционирани подсказки могат да насочват обучаемия към съществена информация, без да претоварват визуалния канал.

Трето, адаптивната звукова среда може да се използва за регулиране степента и комплексната интеграция на когнитивното натоварване. При начинаещи може да се използва по-чиста и структурирана акустична картина, докато при напреднали — по-реалистична и сложна среда. Това съответства на принципите на когнитивното натоварване, според които дизайнът на обучението трябва да отчита ограничената работна памет и нивото на предварителни знания. [8]

Четвърто, звукът увеличава присъствието и емоционалната ангажираност. Виртуална сцена без звук се усеща като непълна, нереална, „имитационна“. Реалистичната акустика прави средата по-убедителна, а това повишава сериозно интереса, мотивацията и ангажираността на съвременните млади хора. Аурализацията и дигиталните технологии обуславят необходимостта от образователна трансформация. „Новите технологии позволяват употребата на

интерактивни ресурси, упражнения, игри, тестове и др., което превръща процеса в достъпен, интересен и отговарящ на потребностите за учене на дигиталното поколение“. [4] Но този ефект трябва да бъде балансиран, защото прекалената сетивна наситеност лесно може да премине в излишна дезориентация или отвличане на вниманието.

Пето, ИИ-базираните звукови среди създават богати възможности за персонализирано обучение според критерии като ниво на знания, ефективност на умения, психологически и когнитивни стереотипи, индивидуален анализ на данни за грешки, време за реакция, предпочитания, слухова чувствителност и учебна цел.

Предизвикателства, контрааргументи и рискове

Въпреки потенциала на виртуалната акустика и ИИ звуковите среди, съществуват няколко сериозни проблема.

На първо място това е нивото на техническо обезпечаване. Реалистичната акустична симулация в реално време изисква значителни изчислителни ресурси. Ray tracing и динамичните импулсни характеристики представляват комплексна задача за изпълнение особено при големи сцени, множество източници и мобилни устройства. Това налага честа употреба на приближения и опростяване, които намаляват физическата точност.

Вторият проблем е педагогически. Не всеки реалистичен звук е полезен за учене. Понякога опростената звукова среда е по-ефективна от напълно реалистичната. Това е особено важно при начинаещи, при деца или при сложни дисциплини, където излишните стимули могат да затруднят разбирането в началото на процеса. Трябва да се осигури идеално равновесие между когнитивна, перцептивна и проактивна динамика, или „наличието на особено разграничение между динамиката на процеса и статиката на крайния резултат“. [1]

Едно от сериозните предизвикателства представлява достъпността. Хора със слухови нарушения, невросензорна чувствителност, шумова тревожност или различни когнитивни профили възприемат звуковата среда по различен начин. Затова адаптивността трябва да включва не само интелигентна оптимизация, но и възможност за широкообхватен контрол от страна на потребителя.

Не трябва да се пропуска и аспекта свързан с етични и психологически основания. ИИ системи, които адаптират звукова среда според поведение, събират данни за внимание, движение, реакция и грешки. Това поставя въпроси за поверителност, прозрачност и контрол върху данните. Освен това психологическата устойчивост на потребителите трябва да бъде изключително прецизно определена и съобразена с предвидените симулации, за да се избегне прекомерен стрес, тревожност или дискомфорт, особено по-високи нива на интензивност. Изследванията върху психологическите ефекти на VR показват, че силната реалистичност може в определени ситуации да усилва негативни емоционални реакции и дори да инициира травматични състояния.

Не на последно място трябва да се спомене рискът от технологичен фетишизъм. Не всяка образователна ситуация се нуждае от VR и AI звук. Технологиите трябва да бъдат подчинени на педагогическата цел, а не обратното. Класическите педагогически взаимодействия притежават потенциал, доказан през

хилядолетията, и той трябва за бъде разширяван, обогатяван и подпомаган с дигиталните технологии, а не заместен от тях.

Като съществен негатив във времето може да се посочи и проблема с масовизацията и намаляване нуждата от високоспециализирани аудиоумения. Подобна ИИ технология, както всяка друга, ще повиши демократизацията и приложението на професионална и качествена аурализация, като същевременно ще направи голяма част от ниския и средния ешелон специалисти в аудиосферата ненужни или бутиково-екзотични.

Тенденции за бъдещо развитие

Бъдещето на акустиката във виртуалните обучителни пространства вероятно ще се развива все по-интензивно. Използването на хибридни акустични модели, които комбинират физическо моделиране и машинно обучение тендира към все по-широко приложение. Изчисленията на отделните отражения изцяло в реално време вероятно ще премине в употреба на ИИ предсказани акустични параметри и ИИ генерирани импулсни характеристики. Нови изследвания вече разглеждат предсказване на room impulse responses чрез невронни мрежи и използване на комбинации от image-source и ray-tracing подходи.

Също така развитието на генеративният звуков дизайн очертава много богати перспективи. Не е далеч времето, когато с помощта на словесни указания и точни параметри всеки учител ще бъде в състояние да генерира с ИИ конкретни пространства, звукови слоеве, реалистични звукоизточници, и да оформи цялостна звукова среда според дадената необходимост.

Всичко това логично ще доведе до повишаване ролята на персонализираното пространствено аудио преживяване. Индивидуални HRTF профили, слухови предпочитания и адаптацията към конкретни слушалки ще подобрят локализацията и реализма, като ползвателите ще разполагат с все по-добре моделиран звук, създаден „специално за тях“. Това е свързано и с по-високо ниво на интегриран мултимодален образователен анализ. Звукът ще се адаптира не само според позицията на обучаемия, но и според поглед, жестове, грешки, темп на работа и физиологични показатели. Това ще отвори значителни възможности за по-прецизно обучение, но изисква също така сериозни правила за етична употреба.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Акустиката на виртуалните обучителни пространства е ключов, но все още недостатъчно използван елемент от дигиталната трансформация на образованието. Звукът не е само фон или ефект, а носител на информация, пространство, внимание и емоционална ангажираност. Когато е проектиран внимателно, той може да подпомогне концентрацията, ориентацията, паметта и реалистичността на учебната симулация.

Предложената рамка съчетава акустично моделиране, пространствено аудио и ИИ-базирана адаптация. Тя разглежда звуковата среда като динамична система, която реагира на пространство, задача, поведение и индивидуални характеристики на обучаемия. Практическите приложения включват всичко – от виртуални лаборатории, медицински симулатори, и архитектурно обучение до

езикови среди и тренировки за безопасност. „Получава се истинска "барокова" постройка – комплицирана, крупна, с интензивен емоционален заряд.“ [2]

Един от най-ценните аспекти на този подход е в интердисциплинарното свързване на акустично инженерство, образователна психология, звуков дизайн и изкуствен интелект. Бъдещото развитие ще зависи от баланса между реализъм и педагогическа ефективност, между автоматизация и човешки контрол, между персонализация и етична защита на данните. Най-големият потенциал на ИИ-базираните звукови среди не е просто да направят виртуалното обучение по-печетляващо, а да го направят по-разбираемо, по-достъпно и по-адаптивно към реалните нужди на обучаемите.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гочев, Я. (2017). *Психология на движението*. В: Електронно издание „Музикален Логос“, 2017. ISSN 2534-8973 (Музикален Логос)
- [2] Леви, С. (2026). *Някои типове формообразуващи функции на канона в хорални прелюдии на Бах – полифонични съображения*. В „Академичен форум „Интегрална музикална теория“ 12/2025 ЖАНРЪТ В ПЪТЯ НА МУЗИКАТА“. ISSN 2683-0841. Стр. 198 – 216.
- [3] Леви, С. (2026). *Потенциални реализации на някои от четирнадесетте канона по баса на Голдберг вариации BWV 1087*. Електронно издание „Музикален логос“, ISSN 2534-8973. Стр. 19. (Алманах НМА)
- [4] Стефанова, П. (2023). *Използване на иновационните образователни технологии в обучението по музика*. В Стратегии на образователната и научната политика. Volume 31, Number 4s, 2023. Стр. 168 – 179.
- [5] Blauert, J. (2008). *Räumliches Hören*. In: *Weinzierl, S. (eds) Handbuch der Audiotechnik. VDI-Buch*. Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-3-540-34300-4 (Springer)
- [6] Mayer, R. E. (2014). *Multimedia Learning; The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. Cambridge University Press. ISBN: 9781139547369 (Cambridge University Press & Assessment)
- [7] Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive Load Theory*. Springer New York, NY. (Springer)
- [8] Sweller, J. (2024). *Cognitive load theory and individual differences*. In Learning and Individual Differences. Volume 110 February 2024. (ScienceDirect)
- [9] De Witte, B. et al. (2026). *Immersive virtual reality learning and cognitive load: A multiple-day field study*. In: Computers in Human Behavior. Volume 176, March 2026. (ScienceDirect)
- [10] Zang, Y. (2025). *GSound-SIR: A Spatial Impulse Response Ray-Tracing and High-order Ambisonic Auralization Python Toolkit*. В arXiv:2503.17866v1 [cs.SD] 22 Mar 2025. (arXiv)
- [11] Oh, J. et al. (2026) *Empowering everyone to customize sound experience with Generative AI SnapSound*. В International Journal of Human-Computer Studies Volume 207, January 2026. ISSN: 1071-5819. (ScienceDirect)
- [12] Zhao, H. et al. (2025). *Room Acoustic Modelling Using a Hybrid Ray-tracing/Feedback Delay Network Method*. In Proceedings of the 28th International

Conference on Digital Audio Effects (DAFx25), Ancona, Italy, 2- 5 September 2025.
(dafx25.dii.univpm.it)

[13] Rahimi, Sadeghi-Niaraki & Choi. (2023). *Generative AI Meets Virtual Reality: A Comprehensive Survey on Applications, Challenges, and Future Direction*. In IEEE Access, n: DOI 10.1109/ACCESS.2025.3574779. Volume 11, 2023. P. 1 (riviste.unimi.it)