International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

МНОГОКРИТЕРИАЛЕН ИЗБОР И АПАРАТНО-ПРОГРАМНА АРХИТЕКТУРА НА СПЕЦИАЛИЗИРАН ГЕНЕРАТОР ЗА КОНТРОЛИРАНИ АКУСТИЧНИ СТИМУЛИ

Силвия Станева[1], Горан Горанов[2]

[1]ТУ-Габрово, ул. Хаджи Димитър 4, гр. Габрово, България
[2]ТУ-Габрово, ул. Хаджи Димитър 4, гр. Габрово, България
Кореспондиращ автор: silviq_staneva@abv.bg

MULTICRITERIA SELECTION AND HARDWARE-SOFTWARE ARCHITECTURE OF A SPECIALIZED GENERATOR FOR CONTROLLED ACOUSTIC STIMULI

Silviya Staneva[1], Goran Goranov[2]

Abstract

This paper presents an engineering method for selecting a microcontroller and defining the hardware-software architecture of a specialized generator for controlled acoustic stimuli. ATmega328P, STM32F401RE, ESP32-WROOM-32 and RP2040 are compared using real-time processing capability, DMA/I²S support, timing determinism, memory resources, audio-output flexibility and implementation complexity. A weighted five-point assessment gives integral scores of 1.70, 4.60, 4.40 and 3.65, respectively, and the ranking remains unchanged when each criterion weight is varied by ±20%. On this basis, STM32F401RE with an external I²S audio DAC is selected for the proposed architecture. A parameterized acoustic-profile model and a software sequence controller are defined for reproducible generation of tones, multi-tone signals, noise, AM/FM modulation and binaural channel differences, together with session logging and output-level control. The system is intended for subsequent within-subject studies of short-term speech responses in children with autism spectrum disorder, without assuming predefined therapeutic frequencies.

Keywords: *controlled acoustic stimuli, multicriteria selection, DDS, STM32F401RE, real-time DSP, acoustic profile, autism spectrum disorder.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Звуковите генератори се използват в измервателната техника, психоакустичните експерименти и системите за цифрова обработка на сигнали. При експериментална работа основният проблем не е само получаването на звук, а точното възпроизвеждане на зададени честоти, амплитуди, времеви зависимости и канални съотношения. В настоящата работа са сравнени ATmega328P, STM32F401RE, ESP32-WROOM-32 и RP2040 като платформи за специализиран генератор, предназначен за работа в реално време и за регистриране на параметрите на всеки подаден стимул.

Приложението е насочено към последващо изследване на краткосрочни речеви реакции при деца с разстройства от аутистичния спектър (РАС). Данните в литературата показват съществени индивидуални различия в слуховата обработка, възприемането на височината на тона и толерантността към звукови стимули [7-9]. Затова честотата и видът на модулацията се разглеждат като експериментални променливи, а не като предварително определени лечебни параметри.

Print ISSN: 1313-230X, Online ISSN: 3033-1404

Целта е да се разработи инженерно обоснован метод за избор на микроконтролер, да се определи апаратно-програмната структура на генератора и да се формализира начинът за задаване и автоматично редуване на акустични профили. Към системата са поставени изисквания за DDS синтез, многокомпонентни и шумови сигнали, AM/FM модулация, двуканална акустична честотна разлика, контрол на изходното ниво, стерео възпроизвеждане и проследимост на всяка сесия.

ИЗИСКВАНИЯ КЪМ ЦИФРОВИЯ ГЕНЕРАТОР

За цифровия генератор са необходими изчислителна производителност за обработка на всяка заявка в реално време, стабилна честота на дискретизация, DMA прехвърляне, цифров аудиоинтерфейс и достатъчен обем RAM за двойно буфериране. При директния цифров синтез (DDS) честотната управляваща дума се определя от [1,2]:

$$M = \mathrm{round}(f_{out} \cdot 2^N / f_s),$$

където fout е зададената изходна честота, fs е честотата на дискретизация, а N е разрядността на фазовия акумулатор. За всеки стимул се използва профил P={fc, A, φ, ΔfLR, mAM, fAM, βFM, fFM, τa, τr, T, c, L}. В него се съхраняват носещата честота, амплитудата и фазата, двуканалната акустична разлика между каналите, параметрите на AM/FM модулацията, времената за плавно нарастване и затихване, конфигурацията на канала и зададеното изходно ниво. Така един и същ стимул може да бъде възпроизведен повторно при същите настройки.

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ

Сравнението обхваща изчислителната производителност, наличната памет, DMA, I²S, DSP/FPU възможностите и начина за получаване на аналогов изход. Данните са сверени с официалната техническа документация [3-6]. ATmega328P е 8-битов AVR с 16 MHz и 2 KB SRAM и е подходящ главно за прости PWM сигнали. STM32F401RE използва Cortex-M4F до 84 MHz, 96 KB SRAM, DSP инструкции, FPU, DMA и I²S. ESP32-WROOM-32 разполага с две Xtensa LX6 ядра до 240 MHz, 520 KB SRAM, I²S и два 8-битови DAC канала. RP2040 използва две Cortex-M0+ ядра до 133 MHz, 264 KB SRAM и PIO блокове за програмируеми цифрови интерфейси.

Табл. 1. Сравнение на микроконтролерните платформи

Параметър	ATmega328P	STM32F401RE	ESP32-WROOM-32	RP2040
Ядро / такт	8-bit AVR 16 MHz	Cortex-M4F 84 MHz	2 × Xtensa LX6 240 MHz	2 × Cortex-M0+ 133 MHz
SRAM	2 KB	96 KB	520 KB	264 KB
DAC	няма	няма	2 × 8-bit	няма
I2S / DMA	не / не	да / да	да / да	PIO / DMA
DSP / FPU	не / не	да / да	DSP / FPU	софтуерни библиотеки
Оценка	базов PWM	детерминиран DSP + външен DAC	висока производителност + безжична свързаност	гъвкав PIO; без хардуерен FPU

За да не се основава изборът само на тактовата честота и обем памет, е използвана претеглена оценка Qj=Σwi·sij. Шестте критерия са работа в реално време и DSP (w=0.25), DMA/I²S (0.20), времева предвидимост (0.20), памет и буфериране (0.15), гъвкавост на аудиоизхода (0.10) и сложност на реализацията (0.10). Всеки кандидат е оценен по скала от 1 до 5 според документираните му възможности и пригодността им за поставената задача.

Табл. 2. Резултат от претеглената многокритериална оценка

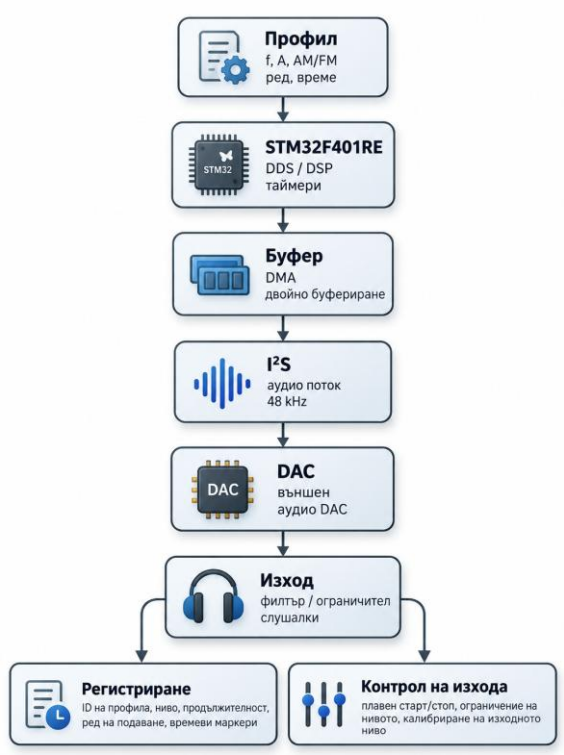
Платформа	Q	Ранг
ATmega328P	1.70	4
STM32F401RE	4.60	1
ESP32-WROOM-32	4.40	2
RP2040	3.65	3

Получените интегрални оценки са 4.60 за STM32F401RE, 4.40 за ESP32-WROOM-32, 3.65 за RP2040 и 1.70 за ATmega328P. При изменение на всеки отделен коефициент с ±20% и последващо нормализиране на теглата STM32F401RE запазва първо място. Това показва, че изборът не е резултат от

единичен силно претеглен критерий, а от съчетанието на DSP/FPU, DMA, I²S и предвидимо обслужване на аудиопотока.

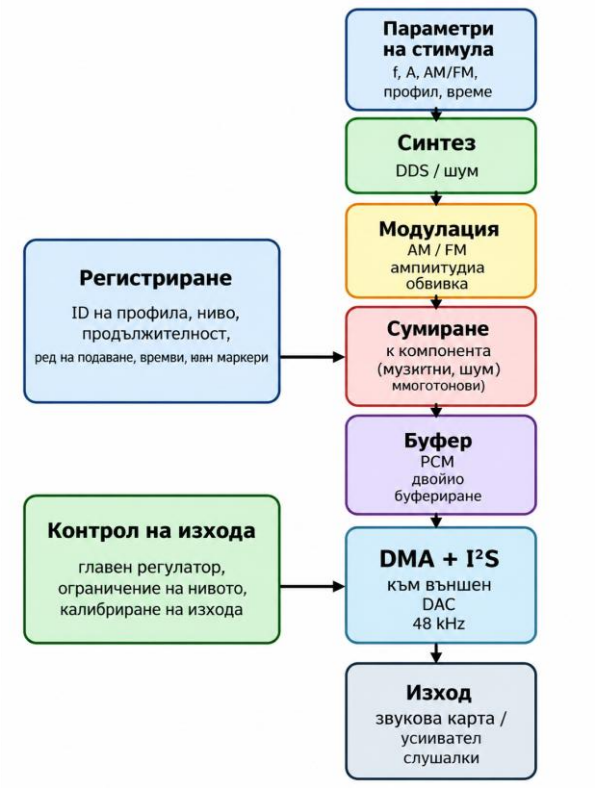
АПАРАТНО-ПРОГРАМНА АРХИТЕКТУРА

Избраната архитектура разделя функциите на синтез, модулация, буфериране, цифров аудиоинтерфейс, преобразуване и контрол на изходното ниво. STM32F401RE изчислява PCM извадките по зададения профил, а DMA прехвърля двойния буфер към I²S без постоянно участие на процесорното ядро. Външният аудио DAC отделя качеството на аналоговия тракт от ограниченията на вградените преобразуватели и позволява последващо калибриране на изхода.



Фиг. 1. Функционална блокова схема на специализирания генератор

Алгоритъмът формира синусоидални сигнали, многотонови комбинации, честотни последователности и бял или оцветен шум. При стерео режим честотите на левия и десния канал могат да се задават независимо, което позволява формиране на контролирана двуканална акустична разлика.



Фиг. 2. Последователност на цифровата обработка

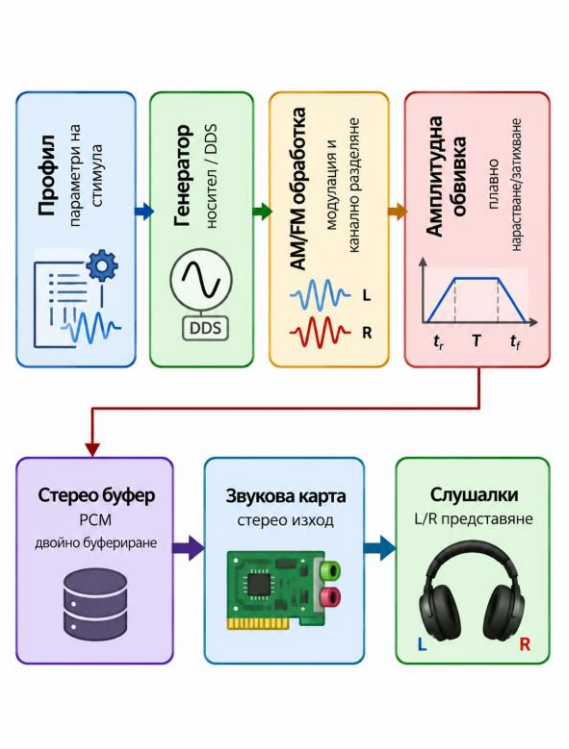
Върху базовия сигнал се прилагат амплитудна и честотна модулация и програмно зададена амплитудна обвивка. След сумиране на компонентите амплитудата се ограничава до допустимия цифров диапазон, след което PCM извадките се записват последователно в два буфера. Докато единият буфер се предава към I²S чрез DMA, вторият се запълва с нови извадки. За автоматично изпълнение на експерименталната сесия е проектиран софтуерен модул за управление на профилите. Последователността се задава като S={(Pi,Ti,Ri)}i=1..K, където Pi е акустичният профил, Ti е активното време, а Ri е паузата след него. Така се намалява рискът от прекъсване на аудиопотока при по-сложни профили.

Табл. 3. Параметри на звуковия стимул, записвани при всяка сесия

Група	Параметри	Предназначение
Спектрални	f_0, A_k, φ_k; тип шум; честотна лента	възпроизводимост на спектъра
Модулация	AM/FM честота и дълбочина; Δf_{LR}	възпроизводим времево-честотен профил
Времеви	T, пауза, повторения; време на нарастване/затихване	еднаква последователност между сесиите
Изход	L/R канал; зададено ниво; ограничение	контрол на изхода и безопасността
Регистрация	ID на профила; дата/час; ред на подаване	проследимост на всяка сесия

Преди стартиране, модулът проверява допустимите стойности на честота, модулацията, ниво и продължителност, след което подава профилите в зададения ред без ръчна промяна на параметрите по време на сесията.

Програмният поток включва зареждане на профила, генериране на носещия сигнал, AM/FM или двуканална акустична обработка, формиране на амплитудната обвивка, запис в стерео PCM буфер и извеждане през звуковия интерфейс. За всяка стъпка се записват идентификатор на профила, момент на начало и край, зададено ниво, ред на подаване и маркер за наблюдавана реакция. Този журнал позволява резултатите от логопедичната оценка да се свържат с конкретния стимул и неговото реално място в сесията. За всеки записан профил се измерват честотната грешка, повторяемостта на изходното ниво, спектралният състав, каналното разделяне и непрекъснатостта на аудиопотока. Относителната честотна грешка се определя като $\delta f = |f_{meas} - f_{set}| / f_{set}$. Повторяемостта се оценява чрез серия от еднакви възпроизвеждания, а работата в реално време - чрез броя на пропуснатите или ненавременно подадени буфери. При стерео профилите допълнително се проверяват разликата между зададените честоти на двата канала и съотношението между техните изходни нива.



Фиг. 3. Блокова схема на софтуерната обработка на акустичните стимули

Табл. 4. Показатели за техническа проверка на генератора

Показател	Метод	Предназначение
Честотна грешка	f_{meas} чрез честотомер/FFT; $\delta f = \|f_{meas} - f_{set}\| / f_{set}$	точност на зададената честота
Повторяемост на нивото	RMS ниво при повторения на един профил	стабилност между сесиите
Спектрален състав	FFT; хармонични и странични компоненти	контрол на синтеза и аналоговия тракт
Непрекъснатост	брой пропуснати или закъснели буфери	надеждност на аудиопотока
Канално разделяне	измерване L→R и R→L при стерео профил	проверка на бинауралното подаване

ПРИЛОЖЕНИЕ

Публикуваните данни не дават основание да се приема една универсална честота с предвидим терапевтичен ефект. Мета-анализът на Chen и съавт. показва малък до умерен групов ефект при възприемането на височината на тона и зависимост от индивидуалните характеристики [8], а Williams и съавт. установяват високо разпространение на

понижена звукова толерантност при PAC [9]. Cochrane обзорите за музикотерапия и auditory integration training не доказват предвидим речев ефект от конкретен звуков стимул [10,11], а ASHA определя AIT като експериментален подход [12].

Планираното изследване е с вътреиндивидуално сравнение: при едно и също дете се подават предварително записани контролни и модулирани профили при еднаква продължителност и зададено ниво. Редът се определя предварително от софтуерния модул, а логопедът маркира момента на наблюдавана реакция. Като показатели могат да се използват латентността до първи вербален отговор, броят на спонтанните вокализации или думи за единица време и отговорът на еднаква словесна подкана. Така се сравняват реакции към конкретни профили, без предварително да се приема лечебно действие на определена честота. При работа със слушалки нивото и продължителността на експозицията се ограничават съобразно принципите за безопасно слушане на WHO-ITU [13].

За всяко дете се предвиждат контролен профил P0 и набор от експериментални профили Pi, които се подават с еднакво зададено ниво и предварително определен брой повторения. Редът на профилите се генерира преди началото на сесията и се записва в журнала, което позволява да се използват рандомизирани или балансирани последователности без промяна на параметрите по време на наблюдението. Между два активни интервала се задава пауза за адаптация, а плавното нарастване и затихване на сигнала намалява резките преходи.

Основните измерими показатели са латентността до първи вербален отговор, броят на спонтанните вокализации или думи за единица време и наличието на отговор на еднаква словесна подкана. За всяко дете реакциите към профил Pi се сравняват с реакциите към контролния профил P0. Първично се оценяват вътреиндивидуалните разлики, а групов анализ се извършва едва след натрупване на достатъчен брой наблюдения. Така индивидуалната вариабилност при PAC не се прикрива от единствена групова средна стойност.

Времевите маркери от програмния журнал и логопедичната оценка се записват по обща времева ос. Това позволява всяка наблюдавана реакция да бъде свързана с конкретен активен профил, неговата честота, модулация и продължителност. Експерименталното приложение при деца следва да се провежда след одобрение от съответната етична комисия и информирано съгласие от родител или настойник.

РЕЗУЛТАТИ ОТ ИНЖЕНЕРНИЯ АНАЛИЗ

Инженерният анализ дава най-висока претеглена оценка на STM32F401RE - Q=4.60, следван от ESP32-WROOM-32 с Q=4.40. Предимството на STM32F401RE за поставената задача се дължи на комбинацията от Cortex-M4F, DSP/FPU инструкции, DMA, I²S и предвидимо обслужване на аудиопотока. Проверка на чувствителността на теглата не променя първото място на платформата. За реализацията е приета конфигурация STM32F401RE + външен I²S аудио DAC. В рамките на работата са формализирани акустичният профил, последователността на профилите и наборът от данни за всяка сесия. По този начин хардуерната платформа, цифровият синтез и програмното управление се разглеждат като една система. Полученият модел позволява по-късно измерените речеви реакции да бъдат съпоставяни с точно определени параметри на стимула, вместо с общо описание на използвания звук.

Получените оценки показват, че STM32F401RE и ESP32-WROOM-32 са близки като общ потенциал, но предимствата им са различни. ESP32 предлага по-голям изчислителен ресурс и безжична свързаност, докато при разглеждания генератор по-голяма тежест имат предвидимото обслужване на аудиопотока,

наличието на DSP/FPU инструкции, DMA и директното свързване към външен I²S преобразувател. Затова разликата в интегралната оценка не трябва да се тълкува като общо превъзходство на една платформа, а като резултат за конкретно зададените инженерни изисквания. При промяна на приложението, например при необходимост от безжично управление или мрежова синхронизация, същият метод може да доведе до друг избор.

Съществена част от предложената система е отделянето на акустичния профил от конкретната хардуерна реализация. Честотата, амплитудата, двуканалната акустична разлика, параметрите на AM/FM модулацията и времевата структура се съхраняват като данни, а не са фиксирани в програмния код. Това позволява един и същ профил да бъде изпълнен многократно, да бъде включен в различни последователности и да бъде сравняван между отделни сесии. За експерименталната работа това е по-важно от самото наличие на голям брой възможни честоти, защото прави стимула проследим и възпроизводим. Същата програмна организация позволява покъсно да се добавят нови форми на модулация, без да се променя логиката за регистриране на сесията.

Работата има и ясни ограничения. Претеглената оценка използва дискретна петстепенна скала и тегла, определени според изискванията на конкретната система. Анализът на чувствителността намалява зависимостта от единичен избор на тегла, но не заменя лабораторното измерване на готовия генератор. На този етап не се представят измерени стойности за честотна грешка, спектрални изкривявания, канално разделяне или крайна латентност, нито се правят изводи за влияние върху речевото поведение на деца. Тези резултати трябва да бъдат получени след изграждането и калибрирането на прототипа. Особено значение имат външният DAC, усилвателният тракт и използваните слушалки, тъй като техните характеристики могат да променят реалното ниво и спектъра на подадения стимул.

След техническата валидация софтуерният модул позволява да се премине към последователни вътреиндивидуални наблюдения с еднакъв начин на задаване и регистриране на стимулите. Така инженерната част и логопедичната оценка остават разграничени: генераторът осигурява измерим и повторяем входен стимул, а ефектът върху речевата реакция се определя единствено от събраните експериментални данни. Това разграничение е необходимо, за да не се приписва терапевтично действие на конкретни честоти преди то да бъде показано с подходящ експериментален дизайн.

АКУСТИЧНИ ПРОФИЛИ

За експерименталната работа са определени шест основни класа профили. Контролният профил използва еднаква честота в двата канала и служи за базово сравнение при същото изходно ниво. Бинауралният профил задава независими честоти fL и fR и контролирана разлика ΔfLR. AM и FM профилите позволяват отделно задаване на честотата и дълбочината на модулацията. Шумовият профил се описва чрез вид шум, честотна лента и ниво, а комбинираният профил обединява няколко параметъра в една възпроизводима последователност. Класификацията не задава очакван клиничен ефект; тя определя само начина, по който стимулът се генерира и записва.

КАЛИБРИРАНЕ И КОНТРОЛ

Цифровата амплитуда сама по себе си не определя звуковото ниво в слушалките. Затова при реализацията на прототипа трябва да се въведе калибрационен коефициент за конкретната комбинация от DAC, усилвател и слушалки. За всеки изходен канал се измерва нивото при референтен цифров сигнал и получената зависимост се записва в конфигурацията на системата. При смяна на слушалките

или изходния тракт калибрацията се повтаря.

Табл. 5. Основни класове акустични профили

Профил	Основни параметри	Роля в сесията
Контролен	fL = fR; без модулация	базова реакция при същото ниво
Бинаурален	fL, fR; ΔfLR	междуканална честотна разлика
AM	fc, fAM, mAM	амплитудно модулиран стимул
FM	fc, fFM, βFM	честотно модулиран стимул
Шумов	тип шум; честотна лента; ниво	контролиран шумов профил
Комбиниран	ΔfLR + AM/FM; времева обвивка	сложен профил с последими параметри

Софтуерният контрол на изхода включва плавно нарастване и затихване, проверка на максимално допустимата цифрова амплитуда и прекратяване на профила при установена грешка в аудиопотока. Тези функции не заменят измерването на реалното акустично ниво, но предотвратяват непредвидени цифрови пикове и осигуряват еднакъв начин на стартиране и спиране на всеки стимул. След калибрирането в журнала на сесията се записват както параметрите на профила, така и използваната конфигурация на изходния тракт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработен е многокритериален метод за избор на микроконтролер за специализиран генератор на контролирани акустични стимули. Оценката обединява изчислителната производителност, DMA/I²S, времевата предвидимост, паметта, аудиоизхода и сложността на реализацията. От четирите изследвани платформи STM32F401RE получава най-висок интегрален резултат Q=4.60 и запазва първо място при анализ на чувствителността на теглата.

За избраната платформа е определена апаратно-програмна архитектура с DDS синтез, двойно буфериране, DMA, I²S и външен аудио DAC. Формализиран е профилът на стимула и е проектирана програмна логика за автоматично редуване на профили, контрол на плавните преходи и запис на събитията в сесията.

Тази организация позволява честотата, амплитудата, двуканалната акустична разлика, AM/FM модулацията и времевата структура да се задават като възпроизводими експериментални променливи. След техническата валидация системата е предвидена за вътреиндивидуални изследвания, при които реакциите към различни профили се сравняват при еднакви условия на подаване.

Необходимо е допълнително измерването на честотната точност, повторяемостта на нивото, спектралните характеристики, каналното разделяне и устойчивостта на аудиопотока. След тази потвърждения, могат да се започнат наблюдения върху речевите реакции, като всички клинични изводи трябва да се основават на реално измерени данни.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Smith, S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California Technical Publishing, 1997. ISBN 0-9660176-3-3.

[2] Analog Devices. MT-085: Fundamentals of Direct Digital Synthesis (DDS). Rev. 0, 2008.

[3] Microchip Technology Inc. ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller, Datasheet 7810D-AVR-01/15, 2015.

[4] STMicroelectronics. STM32F401xD/xE - Arm Cortex-M4 32-bit MCU + FPU, Datasheet DS10086, Rev. 5, 2026.

[5] Espressif Systems. ESP32-WROOM-32 Datasheet, Version 3.8, 2026.

[6] Raspberry Pi Ltd. RP2040 Datasheet: A microcontroller by Raspberry Pi, 2025.

[7] Poulsen, R., Williams, Z., Dwyer, P., Pellicano, E., Sowman, P. F., McAlpine, D. How auditory processing influences the autistic profile: A review. Autism Research, 17(12), 2452-2470, 2024. doi:10.1002/aur.3259.

[8] Chen, Y., Tang, E., Ding, H., Zhang, Y. Auditory Pitch Perception in Autism Spectrum Disorder: A Systematic Review and Meta-Analysis. Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 65(12), 4866-4886, 2022. doi:10.1044/2022_JSLHR-22-00254.

[9] Williams, Z. J., Suzman, E., Woynaroski, T. G. Prevalence of Decreased Sound Tolerance (Hyperacusis) in Individuals With Autism Spectrum Disorder: A Meta-Analysis. Ear and Hearing, 42(5), 1137-1150, 2021. doi:10.1097/AUD.0000000000001005.

[10] Geretsegger, M., Fusar-Poli, L., Elefant, C., Mössler, K. A., Vitale, G., Gold, C. Music therapy for autistic people. Cochrane Database of Systematic Reviews, 2022(5), CD004381. doi:10.1002/14651858.CD004381.pub4.

[11] Sinha, Y., Silove, N., Hayen, A., Williams, K. Auditory integration training and other sound therapies for autism spectrum disorders (ASD). Cochrane Database of Systematic Reviews, 2022(3), CD003681. doi:10.1002/14651858.CD003681.pub3.

[12] American Speech-Language-Hearing Association. Auditory Integration Training [Position Statement]. ASHA, 2004. doi:10.1044/policy.PS2004-00218.

[13] World Health Organization; International Telecommunication Union. Safe listening devices and systems: a WHO-ITU standard. Geneva: WHO, 2019. ISBN 978-92-4-151527-6.