

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.37 + 004.52
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-30-58>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Программно-архитектурная конфигурация многофункционального ADSP-модуля сигнального медиатестирования аудиоустройств

А.В. Геворский[@],
М.С. Костин,
К.А. Бойков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: x33590@gmail.com

Резюме

Цели. Цель статьи – программно-архитектурная разработка и параметрический анализ многофункционального аудиомодуля на базе ADSP-процессора (audio digital signal processor) ADAU1701 в среде *SigmaStudio* для тестирования аудиоустройств в следующих режимах: маршрутизация балансных и небалансных аудиоканалов по дифференциальной схеме «Di-Box/R Di-Box»; пространственно-временная и динамическая аудиообработка; трехполосное моноканальное кросс-разделение с независимой эквализацией; коррекция амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) аудиоканала со следящим режекторным автоподавлением электроакустической положительной обратной связи (ПОС) в заданной спектральной полосе.

Методы. Используются методы визуально-графического архитектурного программирования аудиомодулей в программных средствах *SigmaStudio* и *Flowstone*, алгоритмы сигнальных аудиоизмерений и анализа экспериментальных данных в *REW* и *Soundcard Oscilloscope*.

Результаты. Исследованы характеристики схемы «Di-Box/R Di-Box» для оценки влияния дифференциального преобразования сигнала на отношение сигнал/шум в аудиоканале. Приведены характеристики субмодулей реверберации и сатурации. Показано влияние режимов эквализации на коррекцию АЧХ студийного аудиомонитора. Исследовано воздействие аудиокомпрессора на динамический диапазон и уровень выходного сигнала. Проведены результаты экспериментального исследования субмодуля компенсационной коррекции АЧХ аудиомонитора при помощи согласованной фильтрации, а также получены спектральные характеристики субмодуля автоподавления электроакустической ПОС.

Выводы. Разработана программная архитектура многофункционального аудиомодуля на ADSP-процессоре ADAU1701 для тестирования и отладки медиаустройств в заданном спектрально-динамическом диапазоне. Балансная маршрутизация в 20 раз снижает влияние наводимых на аудиоканал шумов, что позволяет калибровать звукопринимающие аудиоустройства. Субмодуль аудиообработки обеспечивает компрессионную характеристику с динамическим диапазоном от –27 до 18.6 дБ с возможностью эквализационной параметризации в диапазоне 0.04–18 кГц; реверберационную характеристику в диапазоне 0.5–3000 мс; аудиоканальное кросс-разделение на 3 частотных поддиапазона с регулировкой АЧХ в динамическом диапазоне от –30 до 30 дБ. Субмодуль автокоррекции АЧХ позволяет снизить на 40 дБ динамическую неравномерность АЧХ. Субмодуль автоподавления электроакустической ПОС обеспечивает режекторное формантоподавление до –100 дБ при входном динамическом диапазоне от –50 до 80 дБ.

Ключевые слова: аудиомодуль, ADSP, ADAU1701, визуально-графическое программирование, программно-конфигурируемая архитектура, аудиовизуальная обработка сигналов, аудиосигнал, медиатестирование

• Поступила: 13.03.2023 • Доработана: 20.04.2023 • Принята к опубликованию: 18.12.2023

Для цитирования: Геворский А.В., Костин М.С., Бойков К.А. Программно-архитектурная конфигурация многофункционального ADSP-модуля сигнального медиатестирования аудиоустройств. *Russ. Technol. J.* 2024;12(1):30–58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-30-58>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Software-architectural configuration of the multifunctional audio digital signal processor module for signal mediatesting of audio devices

Andrey V. Gevorsky[@],
Mikhail S. Kostin,
Konstantin A. Boikov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: x33590@gmail.com

Abstract

Objectives. The aim of this study is to develop and analyze parameters for a multifunctional audio module based on the ADAU1701 audio digital signal processor in the *SigmaStudio* environment. This will be used for testing audio devices in the following modes: routing of balanced and unbalanced audio channels according to the differential scheme Di-Box/R Di-Box; spatiotemporal and dynamic audio processing; three-band monochannel cross-separation with independent equalization; and correction of the frequency response of the audio channel with tracking notch auto-suppression of electro-acoustic positive feedback in a given spectral band.

Methods. Visual-graphical architectural programming of audio modules in the *SigmaStudio* and *Flowstone*, as well as algorithms for real-time signal audio measurements and analysis of experimental data in the *REW* and *Soundcard Oscilloscope* are used.

Results. The characteristics of the Di-Box/R Di-Box circuit were studied, in order to estimate the effect of differential signal conversion on the signal-to-noise ratio in the audio signal path. The characteristics of the reverberation and saturation submodules were established. Furthermore, the effect of equalization modes on the frequency response correction of a studio audio monitor was determined. The paper also studied the effect of an audio compressor on the dynamic range and the level of the output signal. The experimental results of the submodule for compensating the frequency response of an audio monitor using matched filtering were established, and the spectral characteristics of the submodule for automatic suppression of electro-acoustic positive feedback were obtained.

Conclusions. The software architecture of a multifunctional audio module based on the ADAU1701 audio digital signal processor for testing and debugging media devices in a given spectral-dynamic and spectral-temporal ranges was designed. Balanced routing allows the effect of noise induced into the audio channel to be reduced 20-fold, thus enabling calibration of pickup audio devices. The audio signal processing submodule provides: compression response in the dynamic range from –27 to 18.6 dB with the possibility of equalization parameterization in the range of 0.04–18 kHz; reverberation response in the range from 0.5–3000 ms; audio-channel cross-division into 3 with the ability to adjust the amplitude-frequency response in the dynamic range from –30 to 30 dB. The auto-correction

Keywords: audio module, ADSP, ADAU1701, visual-graphic programming, software-defined architecture, audio-visual signal processing, audio signal, media-testing

For citation: Gevorsky A.V., Kostin M.S., Boikov K.A. Software-architectural configuration of the multifunctional audio digital signal processor module for signal mediatesting of audio devices. *Russ. Technol. J.* 2024;12(1):30–58. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-30-58>

The authors declare no conflicts of interest.

пространственно-временной и сигнальной аудио-коррекции, охватывая сферы сигнальной радиоакустики, аудиовизуальных систем и технологий, в т.ч. внутрисемного медиатестирования и исследования характеристик аудиотрактов электронных средств звукообработки (рис. 1) [1].

Целью данной разработки являлось создание цифровой архитектуры многофункционального лабораторного аудиомодуля в среде *SigmaStudio*² и анализ его характеристик для решения специализированных задач отладки и исследования мультимедийных



Рис. 1. Классификация аудиоэлектронных устройств сигнальной звукообработки.
ИХ – импульсная характеристика; ADSP – audio digital signal processor

² <https://wiki.analog.com/resources/tools-software/sigmastudio>. Дата обращения 20.02.2023. / Accessed February 20, 2023.

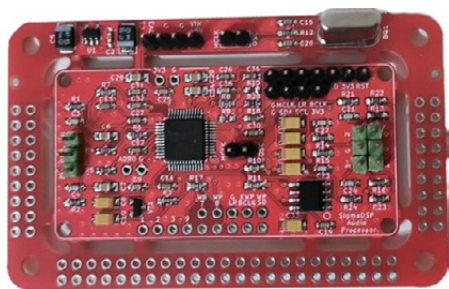


Рис. 2. ADSP-процессор ADAU1701

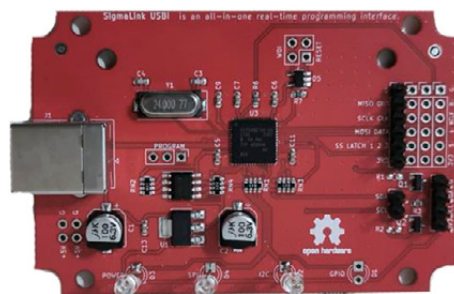


Рис. 3. Программатор SigmaLink-USBi

устройств и комплексов [2]: коммутация и трансформационное преобразование балансных и небалансных аудиотрактов; изучение параметрического влияния эффектов динамической и пространственно-временной обработки на аудиосигнал; создание архитектуры субмодуля автоматической коррекции амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) аудиомониторов в диффузном звуковом поле; создание архитектуры субмодуля автоматического (следающего) подавления электроакустической положительной обратной связи (ПОС); создание архитектуры субмодуля трехполосного кроссовера с независимой графической эквалаизацией в низкочастотных/среднечастотных/высокочастотных (НЧ/СЧ/ВЧ) звуковых диапазонах с заданной параметризацией спектральной сетки частот и соответствующим им добротностям и коэффициентам усиления/аттенюации.

Программная архитектура аудиомодуля выполнена в среде *SigmaStudio* и реализуется на базе аудиопроцессора ADAU1701 (рис. 2), кодируемого программатором SigmaLink-USBi компании Analog Devices (США) по I2C-интерфейсу (рис. 3). Аудиомодуль имеет энергонезависимую память EEPROM M24C64 компании STMicroelectronics (Франция), 2 аналоговых входа с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и 4 выхода с цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП), подключенные к JACK-Audio коннекторам стерео/моноконфигурации соответственно. Питание модуля осуществляется от программатора с выходным напряжением 3.3 В. Динамические диапазоны и отношение сигнал/шум (ОСШ) 32-битных АЦП/ЦАП составляют 100/104 дБ. Сигнальный аудиопроцессор тактируется внешним кварцевым резонатором 12.288 МГц и управляется (транслируется) в режиме реального времени из проектной среды визуального графического программирования *SigmaStudio*. ADAU1701 способен работать с частотой дискретизации до 192 кГц (при этом задаваемый рабочий режим тактирования в проекте многофункционального аудиомодуля – 48 кГц) [2].

На рис. 4 приведена реализация схемотехнической обвязки процессора ADAU1701 сигнального аудиомодуля [2]. На портах 2/4 процессора, являющихся входами АЦП, расположены полосовые

RC-фильтры (RC – resistor capacitor), вырезающие постоянную и высокочастотные составляющие сигнала [3]. Аудиосигнальным выходам схемы соответствуют порты 43–46, также подключенные через полосовые RC-фильтры.

На разъеме аудиointерфейса последовательной шины I2S (обеспечивает связь аудиомодуля с программатором) выведены следующие контакты и шины: «G» – GND, «MCLK» – вывод 32 микросхемы ADAU1701, «LR» – MP4, «BCLK» – MP5, «SDATA» – MP0, «3V3» – питание 3.3 В, «RST» – RESET (рис. 4).

Программно-архитектурная конфигурация многофункционального ADSP-аудиомодуля, состоящего из 5 системно-коммутируемых субмодулей, приведена на рис. 5. Сигнальный аудиомодуль имеет 2 физических входа JACK-Audio «Input1» (рис. 5, поз. 1), подключенных через АЦП к первому субмодулю – «R Di-Box» (reverse direct box) (рис. 5, поз. 2), выполняющему коммутацию балансной (дифференциальной) и небалансной линий. Защиту аудиосистемы от перегрузки по входному уровню обеспечивает цифровой блок лимитера «Limiter1» (рис. 5, поз. 3) с задаваемым ограничением от –24 до +24 дБ. Входной уровень аудиосигнала управляется фейдерным регулятором мощности «Single1» в диапазоне от –30 до +30 дБ. На цифровом коммутаторе «1 × N – 1» (рис. 5, поз. 5) осуществляется маршрутизация выбранного тракта аудиомодуля: верхнее положение – включение в аудиотракт субмодуля аудиоэффектов «Effects» (рис. 5, поз. 6), второе положение сверху – режим сквозного прохождения аудиосигнала (рис. 5, поз. 7), третье положение сверху – включение в аудиотракт субмодуля автокоррекции «AutoCorrection» (рис. 5, поз. 8), четвертое положение – включение субмодуля кроссовера «Crossover» (рис. 5, поз. 9). Первые три кросс-маршрута ведут на сигнальный микшер «S Mixer1» (рис. 5, поз. 10), позволяющий управлять динамическим уровнем выходного сигнала в диапазоне от –30 до +6 дБ. При этом аудиосигнал с выхода субмодуля кроссовера «Crossover» поступает к физическим выходам аудиомодуля «DAC2», «DAC3» напрямую и к выходу «DAC1» через блок сложения «Add2» (рис. 5, поз. 14).

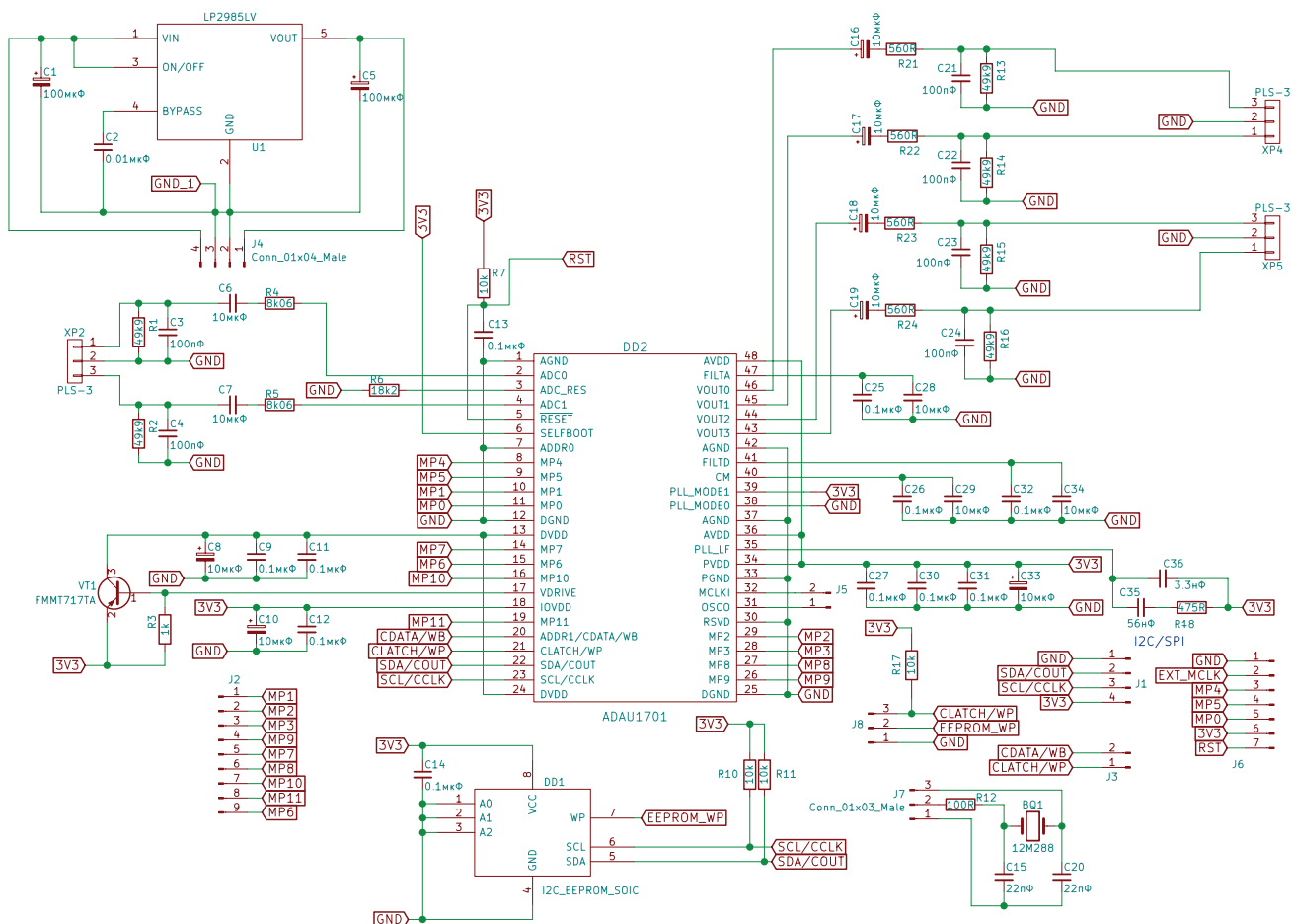


Рис. 4. Схемотехническая архитектура аудиопроцессора ADAU1701³. Здесь и на следующих рисунках обозначения элементов схем соответствуют обозначениям, принятым в ГОСТ 2.710-81⁴

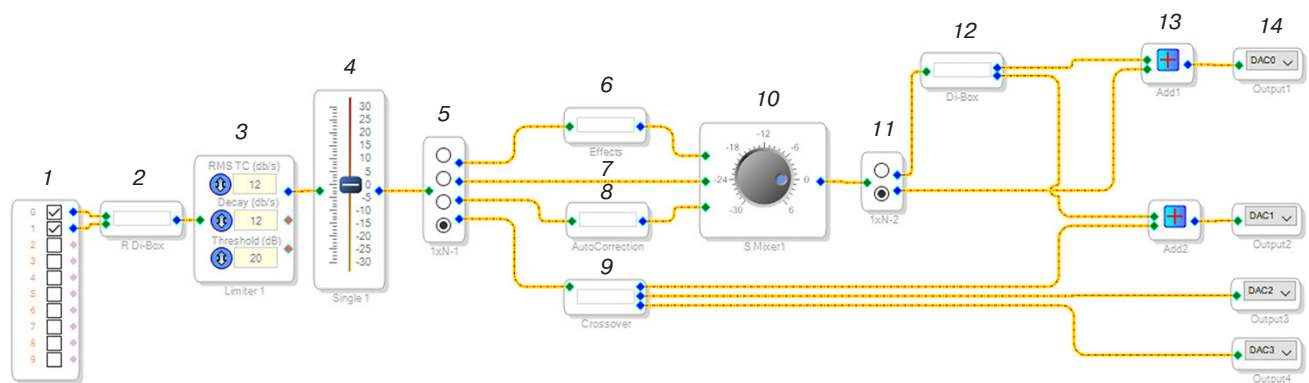


Рис. 5. Программно-архитектурная конфигурация ADSP-аудиомодуля:

1 – вход «Input1»; 2 – субмодуль «R Di-Box»; 3 – лимитер «Limiter1»; 4 – регулятор входной мощности – «Single1»; 5 – цифровой коммутатор «1 × N – 1»; 6 – субмодуль аудиоэффектов «Effects»; 7 – аудиотракт режима сквозного прохождения сигнала; 8 – субмодуль автокоррекции «AutoCorrection»; 9 – субмодуль кроссовера «Crossover»; 10 – сигнальный микшер «S Mixer1»; 11 – цифровой коммутатор «1 × N – 2»; 12 – субмодуль «Di-Box»; 13 – блоки сложения «Add1» и «Add2»; 14 – выходы «DAC0, 1, 2, 3»

³ Analog Devices. ADAU1701 Datasheet. 43 p. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/159293/AD/ADAU1701.html>. Дата обращения 20.02.2023. / Accessed February 20, 2023.

⁴ ГОСТ 2.710-81. Межгосударственный стандарт. Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. М.: Издательство стандартов; 1985. [GOST 2.710-81. Interstate Standard. Unified system for design documentation. Alpha-numerical designations in electrical diagrams. Moscow: Izd. Standartov; 1985 (in Russ.).]

Сигнальный микшер «S Mixer1» подключается к переключателю « $1 \times N - 2$ » (рис. 5, поз. 11), обеспечивающему выбор маршрутизации выходного аудиосигнала между балансной и небалансной линиями: верхнее положение – сигнал коммутируется на парафазный submodule «Di-Box» (direct box) (рис. 5, поз. 12), откуда прямой сигнал идет на физический выход «DAC0», а инверсный (с фазовым сдвигом 180°) – на выход «DAC1». Во втором случае сигнал идет на физический выход «DAC0». Вспомогательные блоки сложения «Add1» и «Add2» (рис. 5, поз. 13) позволяют сократить количество необходимых выводов схемы функциональной архитектуры аудиомодуля.

Субмодули (рис. 5, поз. 2, 6, 8, 9, 12), численная аналитика которых изложена в работе [4], определяют Вох-архитектуру многофункционального аудиомодуля и образуют независимую программно-определяемую конфигурацию.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СУБМОДУЛЯ «DI-BOX/R DI-BOX»

При передаче аудиосигнала по небалансному коаксиальному кабелю наводимые в канале помехи, в т.ч. от других аудиолиний мультикорной коммутации, могут привести к существенному понижению ОСШ [4]. В таком случае целесообразным является применение дифференциальных фазосимметричных линий с монобалансным включением, например, между аудиоконсолью и аудиоустройством, включенным в линию, образующих Di-Box-схему, как показано на рис. 6, где коммутация осуществляется посредством соединений TRS-TRS (tip ring sleeve) или TRS-XLR (external line return).

Таким образом, на входе многофункционального аудиомодуля реализована программно-определяемая схема submodule «R Di-Box» (рис. 7а), позволяющего осуществлять подключение балансной линии, например, от аудиомикшерной консоли к стейдж-боксу [5]. Один из входных каналов проходит через submodule без изменений, а второй инвертируется по фазе. Далее на приемном устройстве сигнал второго канала вычитается из сигнала первого канала, что позволяет компенсировать синфазно подмешанные в дифференциальную линию помехи. В случае небалансного подключения на второй канал аудиосигнал не поступает.

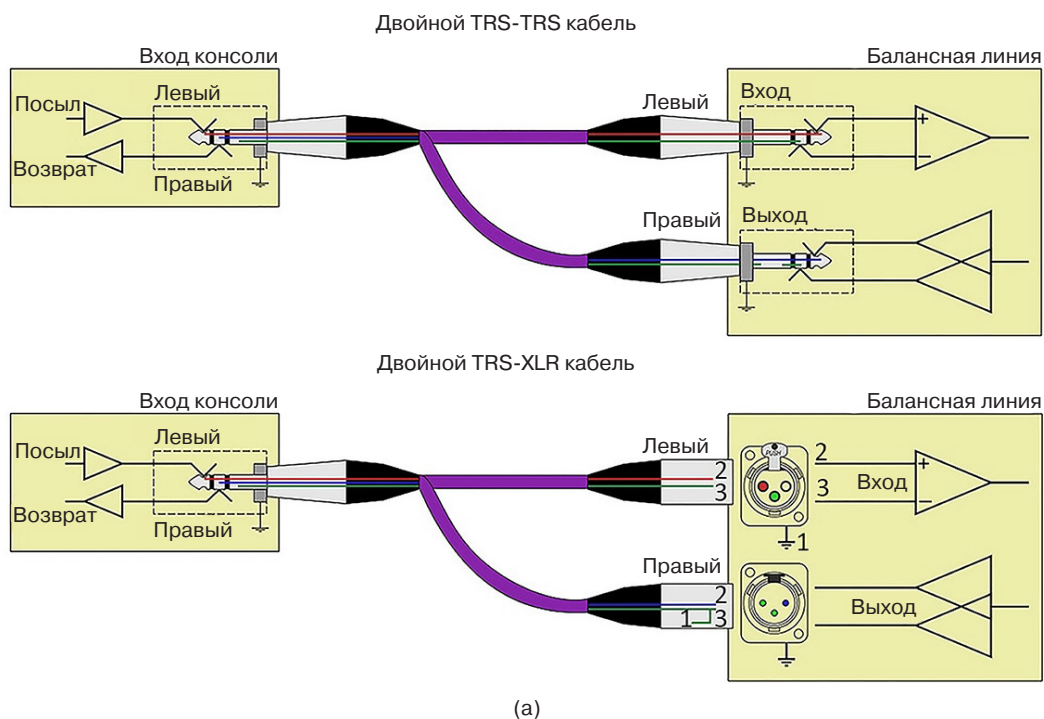
На выходе ADSP-модуля установлен submodule «Di-Box» (рис. 7б), позволяющий преобразовать небалансный моносигнал в балансный – дифференциальный, необходимый для компенсации аддитивной помехи, наводимой на линию аудиотракта. Использование представленного submodule в тестовом испытательном режиме представляет практический интерес при анализе эффективности помехоустойчивости аудиосистем к воздействию внешних электромагнитных наводок и шумов, превышающих -20 дБ, на коаксиальную TRS-аудиолинию⁵.

Для исследования временных характеристик submodule «Di-Box» на вход подается тестовый синусоидальный сигнал амплитудой 35 мВ на тональной частоте 1 кГц, формируемый виртуальным генератором «Signal generator» с программным обеспечением *Soundcard Oscilloscope* [7], с добавлением к нему широкополосной аддитивной помехи с нормальным распределением. В качестве смесителя сигнала с помехой в экспериментальной схеме (рис. 8) используется аналоговый микшерный пульт Xenyx X1622USB (Behringer, Германия) с возможностью моноканального панорамирования. Это необходимо, поскольку два аудиосигнала, полученные со стерео-TRS-выхода submodule (используется в режиме балансной маршрутизации), нужно строго разделить по панораме и подмешать к ним помеху, расположенную по центру стереопанорамы, для равнозначного динамического воздействия на оба балансных канала.

Полученный дифференциальный сигнал через коаксиальную линию поступает на submodule «R Di-Box» (второй аудиомодуль, реализующий схему приема балансного сигнала), построенный на базе вспомогательного ADSP-аудиомодуля, где преобразуется в одноканальный и отправляется на звуковую карту аудиоинтерфейса. Там с помощью программного обеспечения *Soundcard Oscilloscope* [5] регистрируется осциллограмма сигнала с компенсированной помехой (рис. 9).

Анализируя осциллограммы, приведенные на рис. 9в, 9г, 9е, можно заметить, что балансное подключение увеличивает ОСШ на 26 дБ, однако данная схема не позволяет осуществлять компенсацию независимой помехи, наводимой на каждый канал в отдельности.

⁵ Applied Research and Technology (ART). dPDB Owner's Manual. 2 p. https://artproaudio.com/framework/uploads/2018/06/om_dpdb.pdf. Дата обращения 20.02.2023. / Accessed February 20, 2023.



(b)

Рис. 6. Монобалансная реализация TRS-коннекторной маршрутизации аудиосигнала:
(а) внутрисхемной аудиоперемы (со встроенной на входе/выходе балансной схемой аудиоустройства) «возврат/посыл»; (б) при помощи встраивания в линию промежуточного аналогового Di-Box-устройства трансформаторного типа с возможностью выбора (переключения) «земли» источника (аудиомикшера) или приемника (аудиомонитора и т.д.) [6]

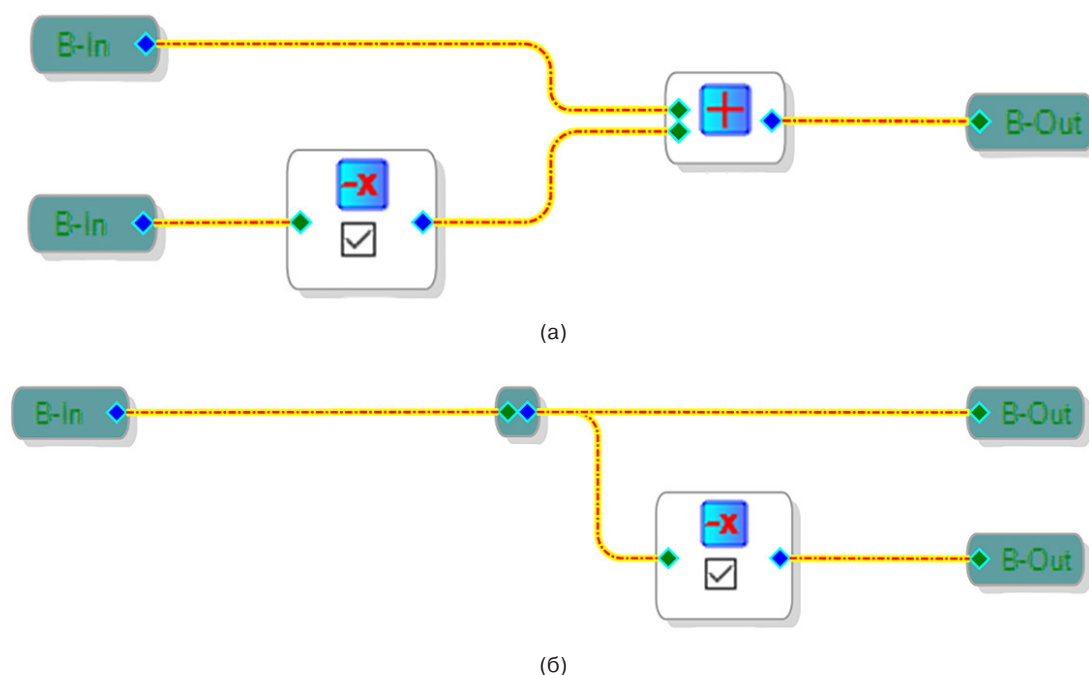


Рис. 7. Программно-определяемая схема submodule комбинации «Di-Box/R Di-Box» на базе ADAU1701:
(а) функциональная реализация модуля «R Di-Box»; (б) функциональная реализация модуля «Di-Box»

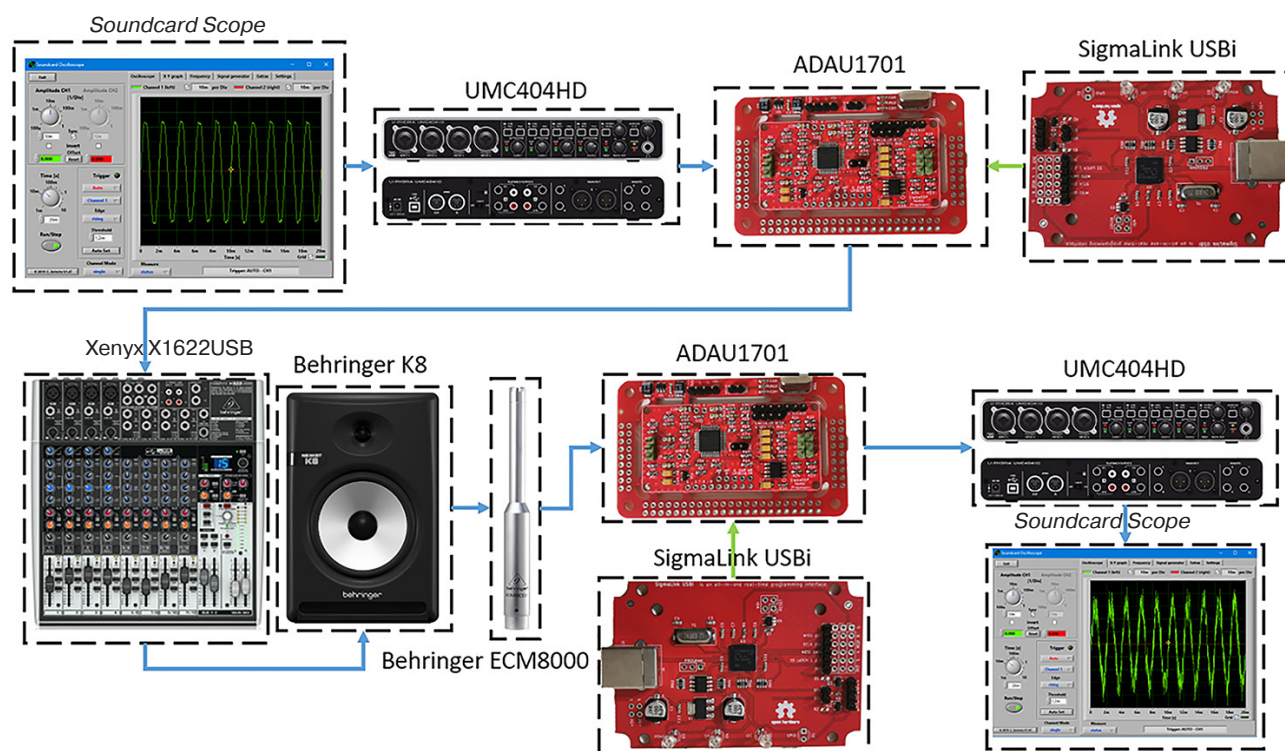
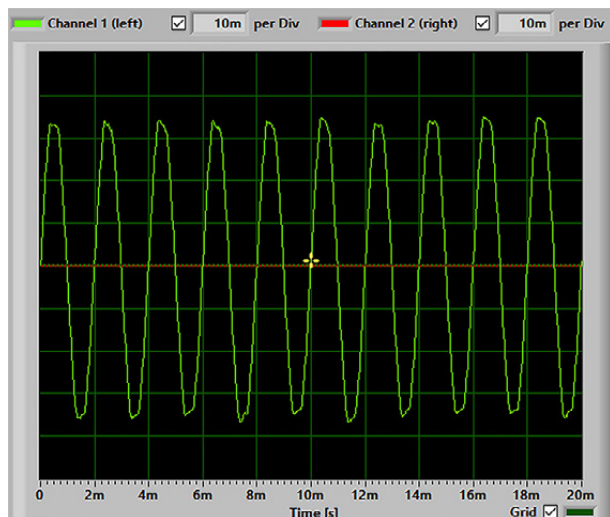
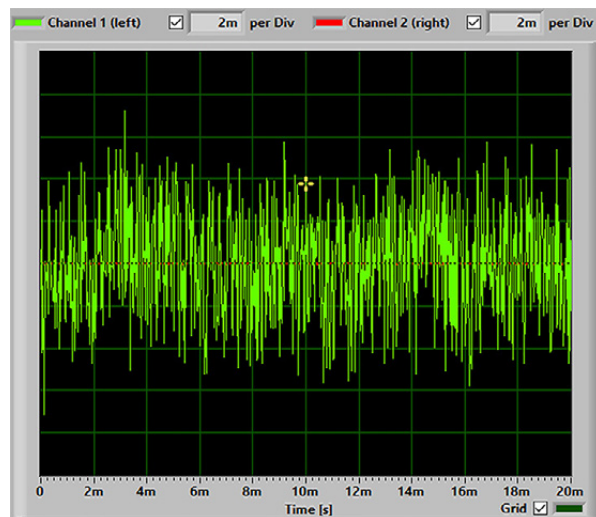


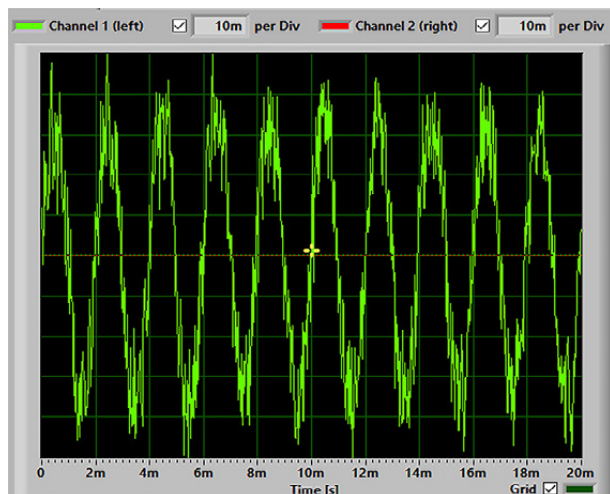
Рис. 8. Схема экспериментального исследования submodule балансной линии подавления широкополосной аддитивной помехи в TRS-аудиолинии. Behringer UMC404HD – аудиоинтерфейс; Behringer K8 – студийный аудиомонитор; Behringer ECM8000 – измерительный микрофон



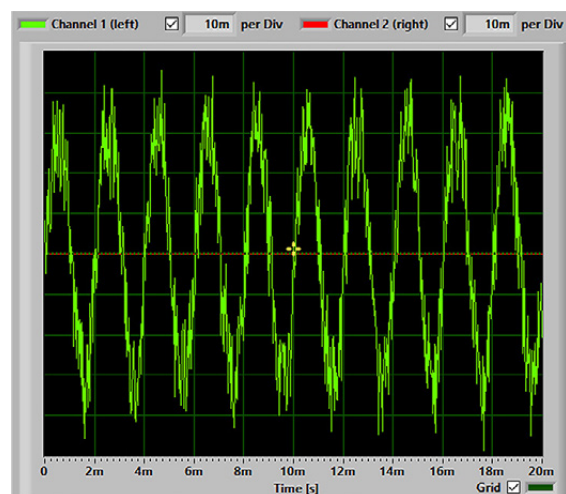
(a)



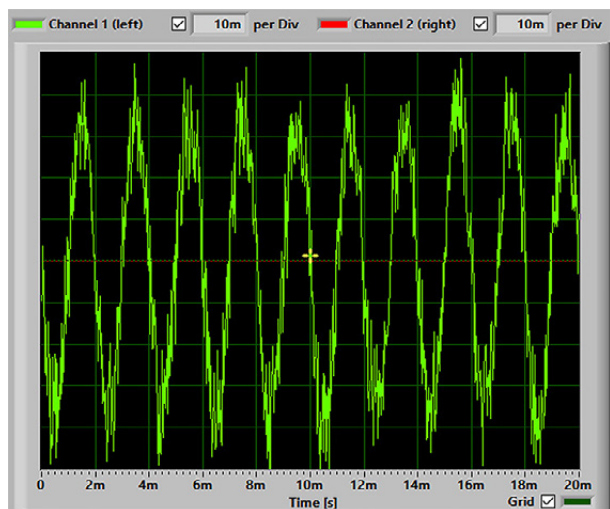
(б)



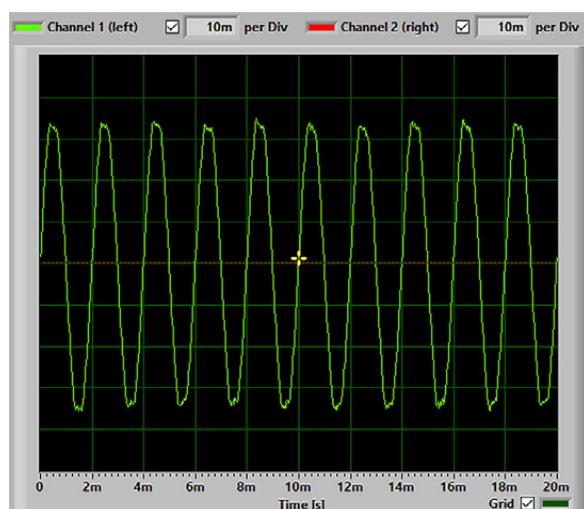
(B)



(г)



(д)



(е)

Рис. 9. Временные диаграммы исследования характеристик балансного аудиотракта, собранного по схеме «Di-Box/R Di-Box»: (а) сигнал при балансном подключении без наведенного шума; (б) аддитивный шум; (в) сигнал при балансном подключении с шумом, наведенным в прямом канале, ОСШ = 9 дБ; (г) сигнал при балансном подключении с шумом, наведенным в инверсном канале, ОСШ = 9 дБ; (д) сигнал при небалансном подключении аудиотракта и аддитивном шуме; (е) сумма прямого и инверсного (обратно инвертированного) сигнала на «R Di-Box», ОСШ = 35 дБ

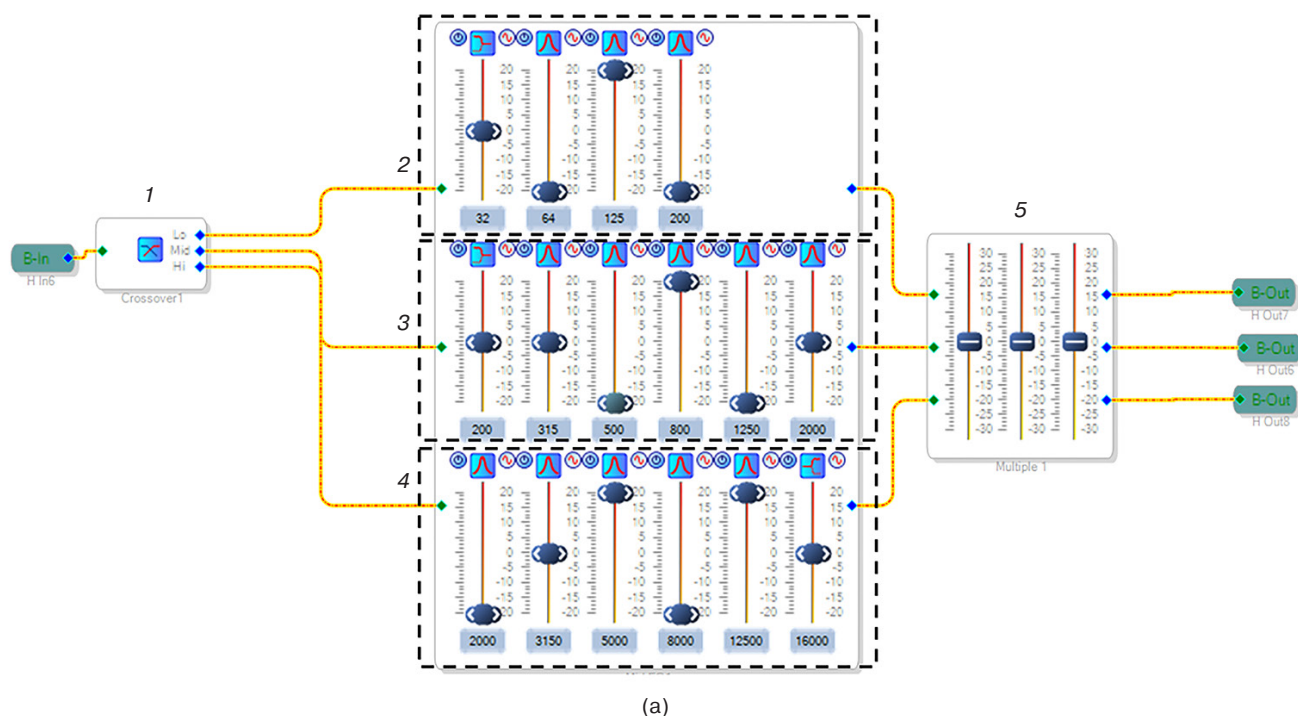
2. РАЗРАБОТКА, АНАЛИЗ И ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СУБМОДУЛЯ ТРЕХПОЛОСНОГО КРОССОВЕРА С НЕЗАВИСИМОЙ ГРАФИЧЕСКОЙ ЭКВАЛИЗАЦИЕЙ

Сигнальный кроссовер представляет собой многополосный фильтр, обеспечивающий разделение аудиосигнала на два или более частотных поддиапазона, адаптированных под эффективную работу электродинамических диффузоров, предназначенных для работы в разных частотных диапазонах [8]. Архитектура реализуемой в проекте схемы субмодуля цифрового кроссовера «Crossover» позволяет разделить аудиосигнал на три полосовых

канала звуковых частот: нижних (40–250 Гц), средних (0.25–3 кГц), верхних (3–18 кГц).

Субмодуль трехполосного кроссовера состоит из блока предварительной эквализации «Crossover1» (рис. 10а, поз. 1), непосредственно разделяющего аудиосигнал на три поддиапазона, набора фильтров (параграфическая эквализационная линейка) в каждом из каналов с динамической подстройкой аттенюации/усиления 10 дБ (рис. 10а, поз. 2–4), а также фейдеров громкости для каждого отдельного канала (рис. 10, поз. 5), регулируемых в динамическом диапазоне от –30 до +30 дБ.

Конфигурируемая архитектура предварительно-го эквалайзера – кросс-фильтра (рис. 10, поз. 1), АЧХ которого приведена на рис. 11, позволяет настраивать



(а)

Рис. 10. Программно-определяемая архитектура схемы субмодуля трехполосного кроссовера:

(а) функциональные блоки:

1 – графический эквалайзер предварительной фильтрации;

2 – параграфический эквалайзер НЧ;

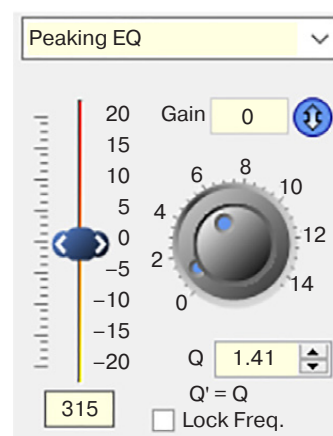
3 – параграфический эквалайзер СЧ;

4 – параграфический эквалайзер ВЧ;

5 – фейдерный блок регулировки выходной громкости;

(б) параметризация настроек полосовых фильтров эквализационного блока (частота, добротность, предельный динамический уровень полосовой/режекторной АЧХ, коэффициент усиления/ослабления)

EQ Settings



(б)

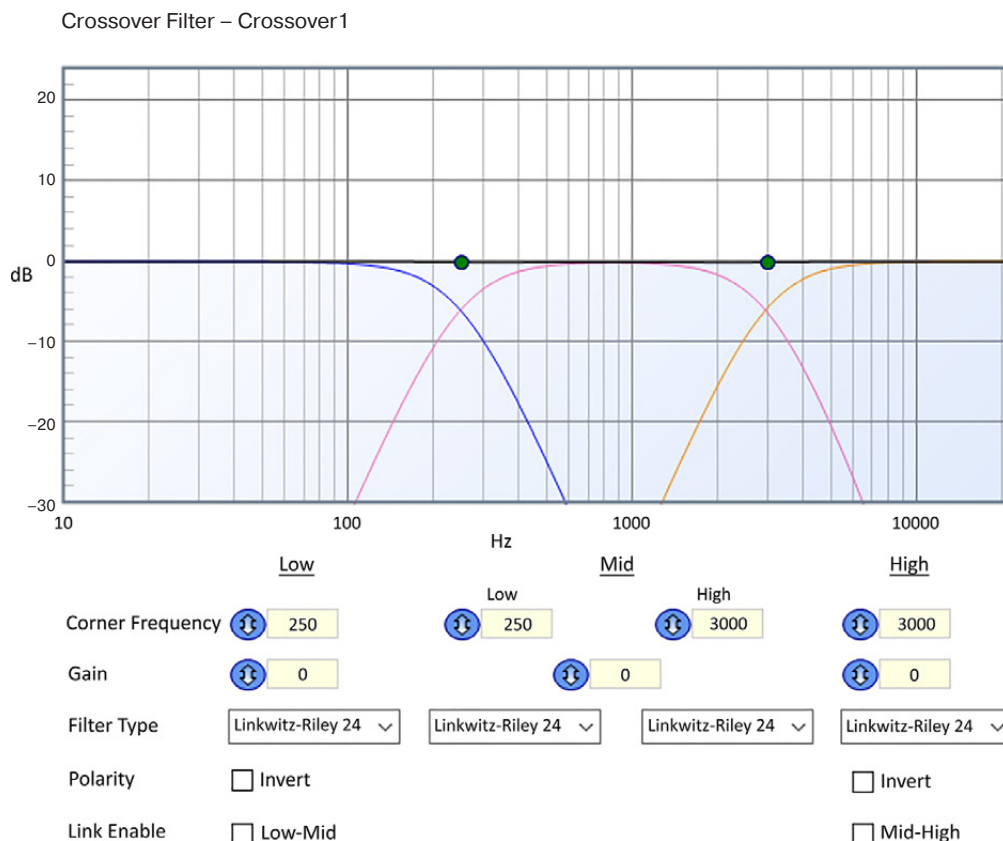


Рис. 11. Управление настройками субмодуля цифрового трехполосного кроссовера

границы разделения полосочастотных каналов, усиливать или ослаблять сигнал в заданной полосе, выбирать тип фильтра, создавать жесткую связь между их границами, а также инвертировать полярность каналов, что приведет к ослаблению сигнала в области пересечения частотных диапазонов [9]. Блоки параграфической эквализации, сформированные из дискретного набора полосовых фильтров, осуществляют независимую эквализацию в НЧ/СЧ/ВЧ-каналах в соответствии с фейдерными предустановками, приведенными на рис. 10а.

Следует отметить, что лабораторное применение субмодуля трехполосного кроссовера в медиатестовом режиме представляет практический интерес при обработке аудиосигнала в заданных частотных диапазонах, его спектральной маршрутизации, а также при проведении испытаний, калибровки и коррекции АЧХ аудиомониторов [8].

Для экспериментального электроакустического анализа сигнального формирования и корректировки частотно-динамических характеристик аудиоканалов на выходе субмодуля цифрового кроссовера произведена регистрация АЧХ каждого из фильтров эквализационной линейки (рис. 10). Электроакустические измерения проводились на базе автоматизированного лабораторного стенда (рис. 12), управляемого при помощи программного

пакета *RoomEQWizard (REW)*⁶, в составе: аудиоинтерфейс Behringer UMC404HD (с калибровочным скриптом), измерительный микрофон Behringer ECM8000 (с калибровочным файлом) и студийный аудиомонитор Behringer K8.

Для чистоты измерений АЧХ аппаратные предустановки аудиоустройств, архитектурная акустика студийной лаборатории, а также взаимоположения между измерительным конденсаторным микрофоном и аудиомонитором не изменялись. Результаты электроакустических измерений полосовых составляющих при нивелированном значении 0 дБ предустановок фильтров эквализационной линейки кроссовера, а также при некотором произвольно задаваемом фейдерном положении (рис. 10а, поз. 2–4) приведены на рис. 13.

Важно отметить, что управление предустановками эквализационной линейки позволяет корректировать АЧХ аудиомонитора под заданные характеристики частотно-динамического баланса при полосовом разделении и аудиосигнальном панорамировании (рис. 14) [1]. На рис. 13а, 13б в окрестности частоты 125 Гц наблюдается предустановленный кроссовером динамический подъем АЧХ на 6 дБ,

⁶ <https://www.roomeqwizard.com/>. Дата обращения 02.12.2022. / Accessed December 02, 2022.

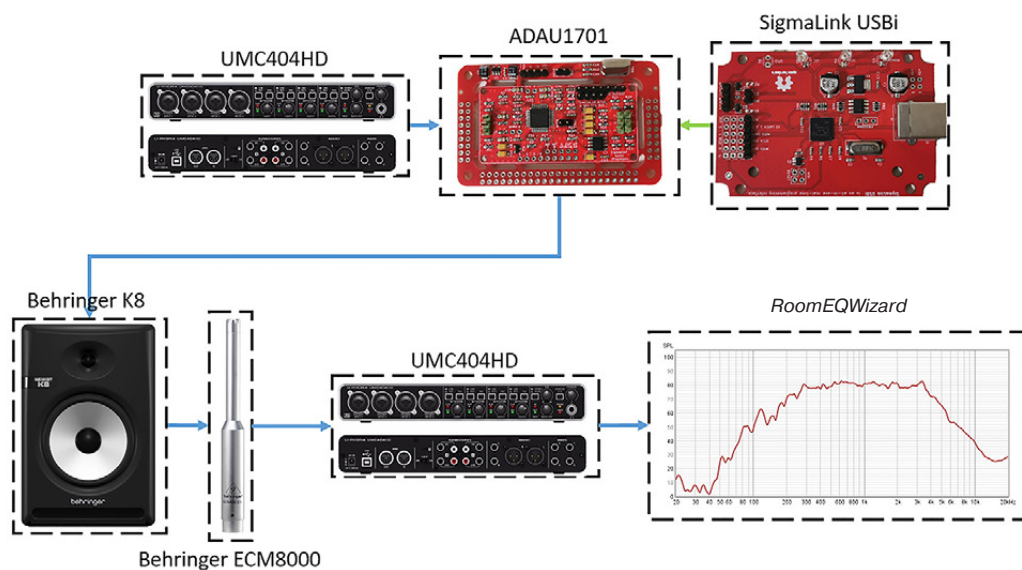


Рис. 12. Схема экспериментального исследования управления настройками АЧХ студийного аудиомонитора при помощи субмодуля цифрового кроссовера

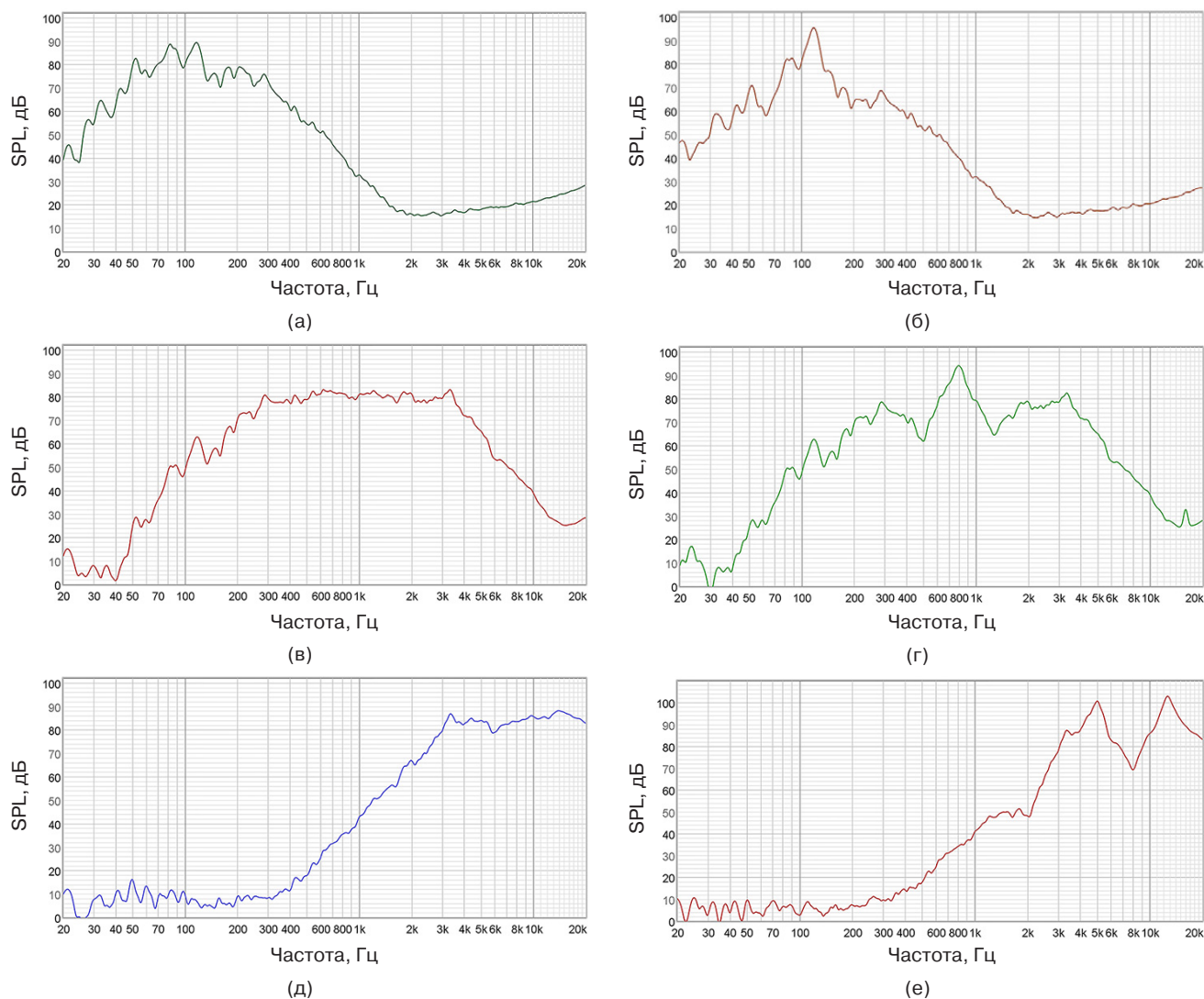


Рис. 13. АЧХ студийного аудиомонитора, сформированные субмодулем цифрового кроссовера в заданной спектральной области при нивелированном положении 0 дБ предустановок фильтров (слева) и произвольной параметризации эквалайзерной линейки (справа): (а), (б) НЧ-аудиоканал; (в), (г) СЧ-аудиоканал; (д), (е) ВЧ-аудиоканал. SPL (sound pressure level) – уровень звукового давления

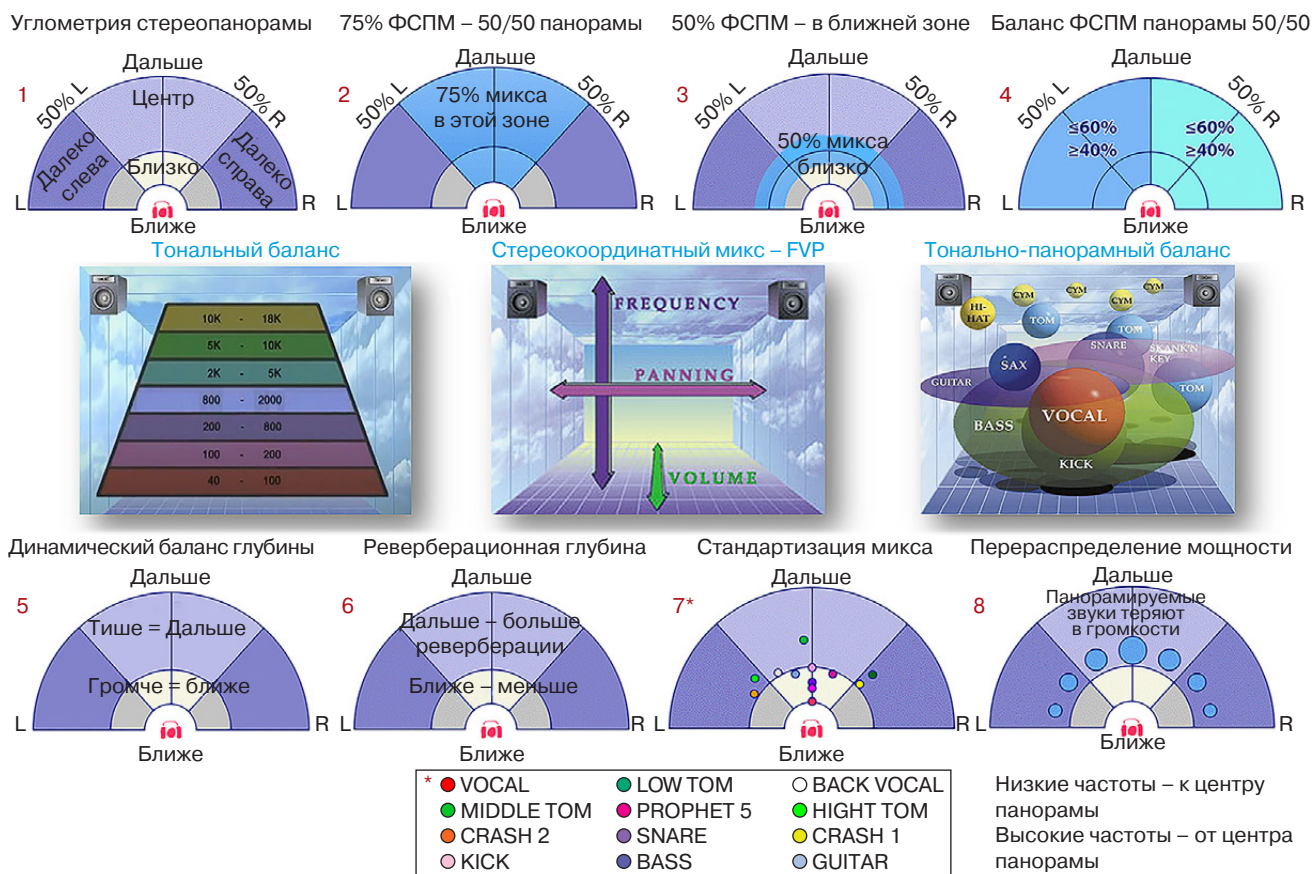


Рис. 14. Панорамирование ФСПМ по частоте (высоте тона) и интенсивности звука (глубине)

а в области 64 Гц – динамический спад на 18 дБ. На рис. 13г, по сравнению с рис. 13в, виден динамический подъем АЧХ на частоте 800 Гц на 12 дБ и снижение амплитуды на частотах 500 и 1200 Гц на 16 и 18 дБ соответственно. В окрестности частоты 8 кГц (рис. 13д, 13е) появился спад амплитуды на 14 дБ, а в области 5 и 16 кГц – подъем на 16 дБ.

Из произведенных измерений следует, что субмодуль трехполосного кроссовера осуществляет разделение аудиосигнала на три аудиочастотных канала: 20–250 Гц, 0.25–3 кГц, 3–18 кГц, и обеспечивает воспроизводимую регулировку АЧХ в каждом из них в диапазоне от –30 дБ до 30 дБ с возможностью параметрической коррективки. Это позволяет использовать данный субмодуль для маршрутизации аудиосигнала в трехполосных акустических системах, обеспечивая возможность проведения независимых исследований каждого из каналов и панорамирование функции спектральной плотности мощности (ФСПМ) акустического сигнала по частоте (рис. 14).

3. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СОСТАВНОЙ АРХИТЕКТУРЫ СУБМОДУЛЯ АУДИОЭФФЕКТОВ

Субмодуль аудиоэффектов «Effects» (рис. 15) включает в себя блоки эквалаизации, реверберации,

компрессии и сатурации, образующие инсертную линейку обработки аудиосигнала. На выходе субмодуля установлен аудиомикшер, подмешивающий к исходному аудиосигналу («саундчеку») сигналы эффектов – ревербератора и сатуратора с возможностью регулировки выходных уровней каждого из них. Рассмотрим подробнее элементы цифровой архитектуры субмодуля эффектов и его функционально-графическую топологию, приведенную на рис. 15.

3.1. Анализ и параметризация характеристик аудиокомпрессора

При анализе динамических характеристик компрессора, обеспечивающего автоматизированную регулировку усиления в режиме выравнивания динамического диапазона входного сигнала цифрового субмодуля, необходимо выставить на микшере уровень 0 дБ для канала с сигналом, идущим в обход ревербератора и сатуратора, а для остальных установить минимальные значения. Схема экспериментального электроакустического лабораторного стенда приведена на рис. 12 и соответствует программному переключению аудиомодуля в режим субмодуля эффектов «Effects». Эквалайзер (рис. 15, поз. 2) при этом не задействован, т.е. имеет АЧХ с нивелированным во всей

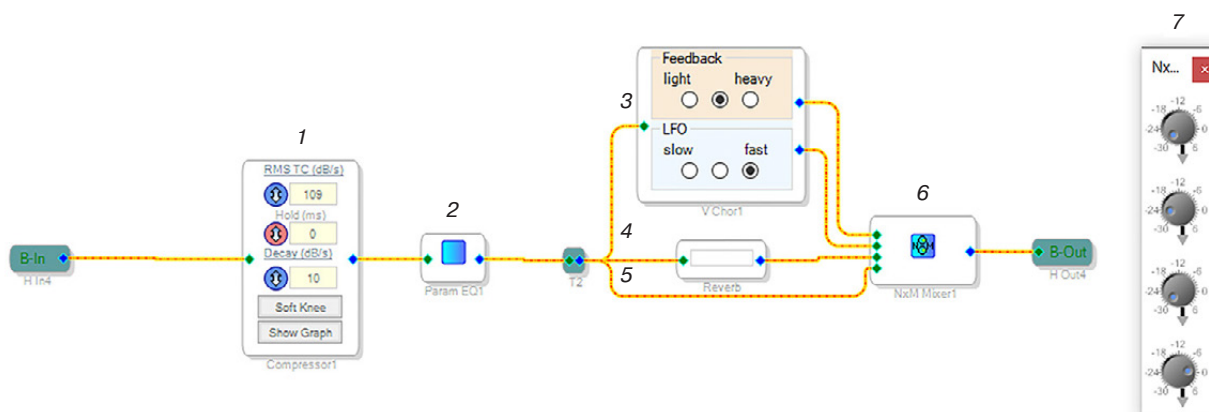


Рис. 15. Программно-определяемая VoX-архитектура схемы submodule аудиоэффектов:
1 – компрессор «Compressor1»; 2 – параграфический эквалайзер «Param EQ1»; 3 – блок сатурации «V Chor1»;
4 – submodule реверберации «Reverb»; 5 – маршрут «саундчек» сигнала; 6 – аудиомикшер «N × M Mixer1»;
7 – окно настроек аудиомикшера «N × M Mixer1»

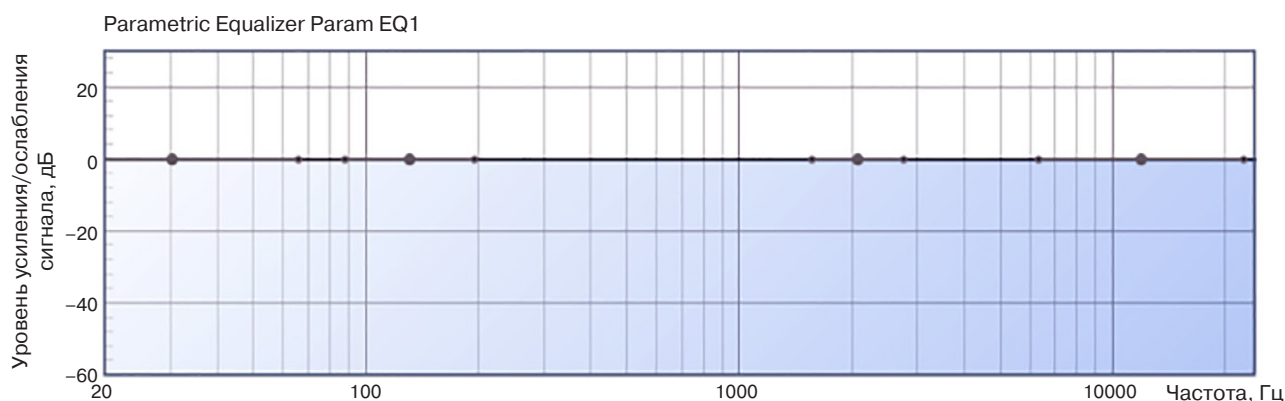
спектральной полосе значением нулевого динамического уровня (рис. 16). Тестирование submodule проводится монотонным линейно-частотно модулированным (ЛЧМ) сигналом типа «Sweep» в диапазоне 0.02–20 кГц и амплитудой 63 дБ, задаваемым из пакета *RoomEQWizard*.

На рис. 17 приведена АЧХ аудиомонитора со свободной компрессионной характеристикой, уровень сигнала равен –38.2 dBFS (decibels relative to full scale, дБ относительно полной шкалы). Поскольку в области нижних частот имеется завал, динамический диапазон АЧХ составляет около 96 дБ.

Рис. 16. Преднастройки submodule аудиоэффектов:
(а) начальная амплитудная характеристика аудиокompрессора (режим, не влияющий на характер прохождения тестового ЛЧМ-сигнала);
(б) нивелированная по уровню 0 дБ эквализационная характеристика submodule



(а)



(б)

Для оценки влияния компрессионной характеристики субмодуля на АЧХ аудиоканала изменим предустановку графического компрессора, сместив положение компрессионной характеристики на 20 дБ (рис. 18).

Обращаясь к рис. 19, можно заметить, что уровень АЧХ увеличился на 25.7 дБ, из которых 5.7 дБ – собственные шумы в аудиоканале. Динамический диапазон АЧХ аудиомониторов при этом составляет

85 дБ, что меньше на 11 дБ, чем при отсутствии каких-либо изменений порога регулировки динамического баланса.

Далее, для анализа влияния компрессора на сжатие динамического диапазона аудиоканала, измеряется уровень выходной АЧХ субмодуля при настройках компрессионной характеристики, позволяющей уменьшить динамический диапазон входного ЛЧМ-сигнала до –18 дБ, как показано на рис. 20.

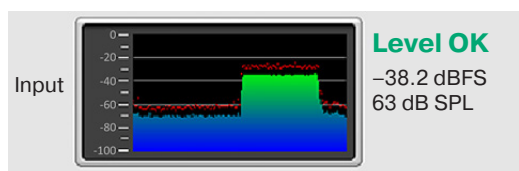
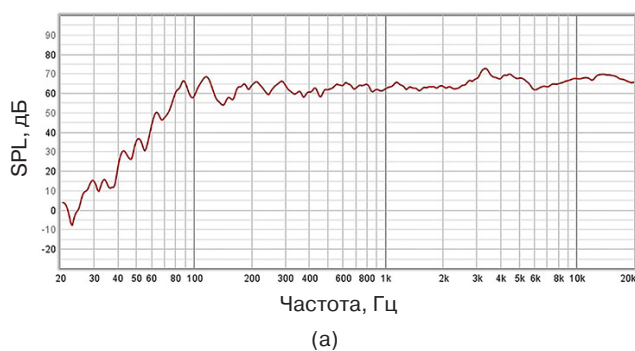


Рис. 17. Результаты тестирования ЛЧМ-сигналом аудиотракта без компрессора (формирование реперной АЧХ): (а) АЧХ аудиомонитора со свободной компрессионной характеристикой (без воздействия предустановок субмодуля эффектов и компрессора); (б) сигнальная параметризация предустановок RoomEQWizard (пиковое значение уровня аудиосигнала относительной полной шкалы в dBFS на микрофоне)

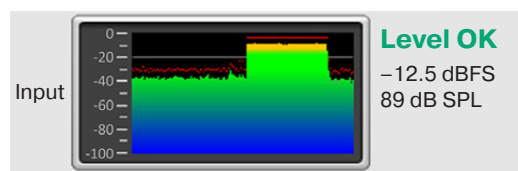
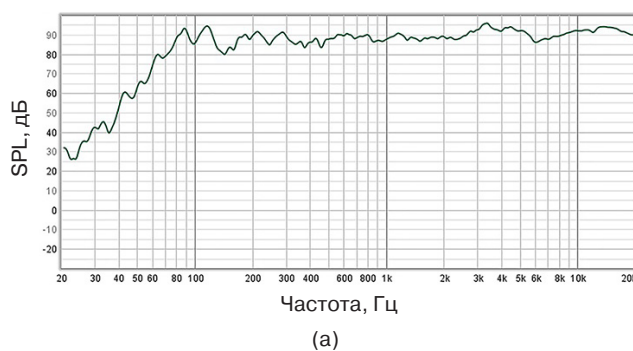


Рис. 19. Результаты тестирования ЛЧМ-сигналом аудиотракта с компрессором при пороге срабатывания 20 дБ: (а) АЧХ аудиомонитора с заданной компрессионной характеристикой; (б) сигнальная параметризация предустановок RoomEQWizard (пиковое значение уровня аудиосигнала относительной полной шкалы в dBFS на микрофоне)

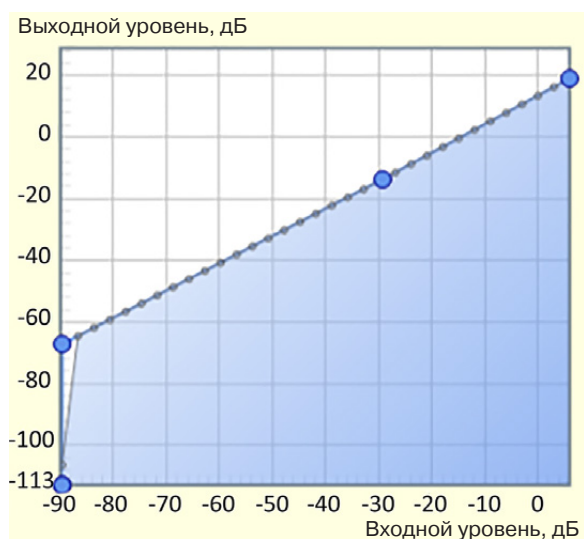


Рис. 18. Предустановки субмодуля аудиоэффектов: установленная компрессионная характеристика с пороговым значением срабатывания компаратора 20 дБ (компандерный режим)



Рис. 20. Предустановки субмодуля аудиоэффектов: установленная компрессионная характеристика с пороговым значением срабатывания компаратора –18 дБ

Из АЧХ, приведенной на рис. 21, можно заметить, что уровень сигнала изменился и составляет -19.6 dBFS, т.е. увеличился на 18.6 dB относительно сигнала без компрессии. Динамический диапазон АЧХ аудиомониторов при этом составляет 69 dB, что меньше на 27 dB, чем при отсутствии каких-либо изменений порога регулировки аттенюации.

Исходя из результатов электроакустических измерений, можно сделать вывод, что компрессор позволяет сжать динамический диапазон сигнала и увеличить его уровень на всем частотном диапазоне по графически задаваемой компрессионной характеристике, что стабилизирует динамический диапазон аудиосигнала без искажений и перегрузки тестируемого аудиоустройства, а также обеспечивает динамический баланс стабилизацию в компандерном режиме [10].

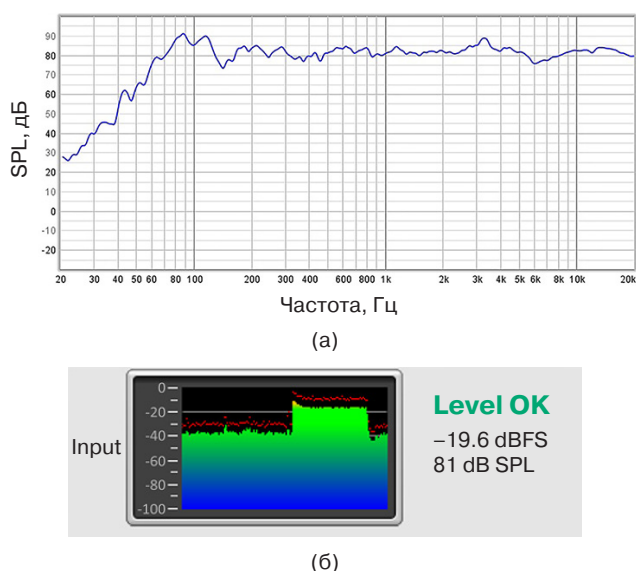


Рис. 21. Результаты тестирования ЛЧМ-сигналом аудиотракта с компрессором при пороге срабатывания -18 dB: (а) АЧХ аудиомонитора с заданной компрессионной характеристикой; (б) сигнальная параметризация предустановок RoomEQWizard (пиковое значение уровня аудиосигнала относительно полной шкалы в dBFS на микрофоне)

3.2. Анализ и параметризация характеристик эквалайзера

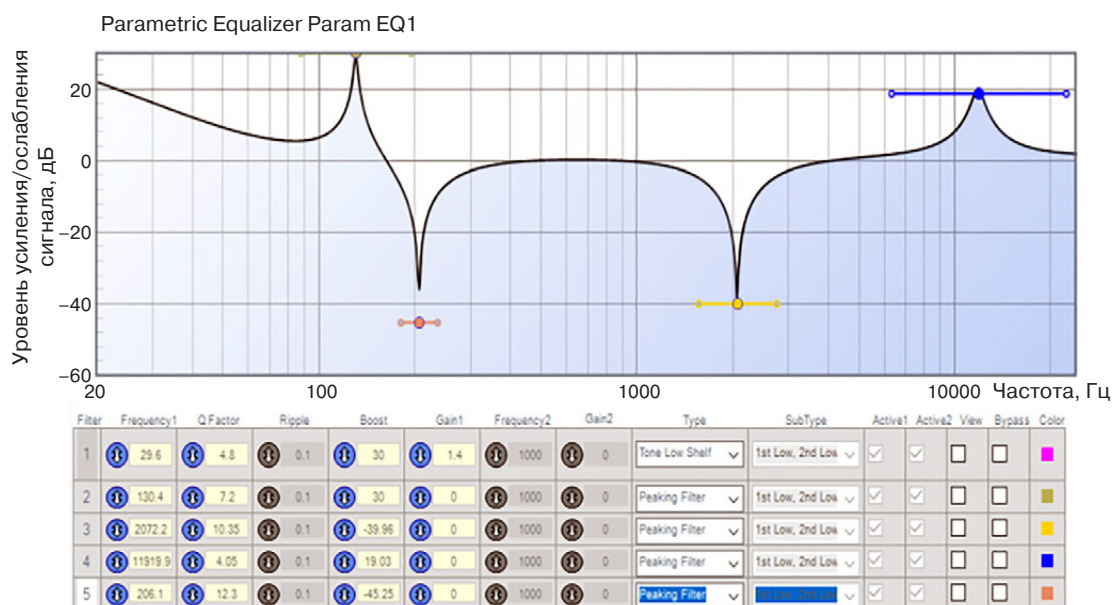
Для независимого анализа эквализационной характеристики субмодуля эффектов необходимо включить компрессор в режим «bypass» (сквозного обхода) и установить заданные предустановки (частота, добротность, усиление/аттенюация) эквализационных фильтров для двух вариантов формирования конфигурации АЧХ акустического сигнала (рис. 22). Нужно отметить, что разработанный блок параграфического эквалайзера многофункционального аудиомодуля позволяет установить до 15 элементов аудиофильтрации.

Как видно из рис. 22б и 22г, АЧХ аудиомониторов повторяют предустановленные эквализационные конфигурации (рис. 22а, 22в) с корреляционной воспроизводимостью 0.85 , обусловленной неравномерностью АЧХ аудиомонитора. На участке спектра, соответствующем фильтру (рис. 22а) на частоте 130 Гц с усилением на 30 dB, амплитуда увеличена приблизительно на 20 dB по сравнению с амплитудой той же спектральной полосы без обработки. Схожую ситуацию можно наблюдать и для фильтра на частоте 2.072 кГц, с ослаблением на -39.96 dB – амплитуда спектральной полосы в данной точке приблизительно на 30 dB ниже по сравнению с амплитудой исходного спектра. Также можно заметить общий динамический подъем амплитуды нижних формант в среднем на 20 dB, как и задано на НЧ-фильтре. Из рис. 22в можно также заметить: для второго варианта эквализационной конфигурации АЧХ с обработкой повторяет форму спектра, заданную на эквалайзере (рис. 22г), что можно определить по увеличению амплитуды в среднем на 20 dB для частот на диапазоне до 100 Гц (в данном случае вытянуты динамические уровни на частотах, «заваленные» физическими параметрами аудиомонитора), а также по ослаблению верхних частот приблизительно на -35 dB.

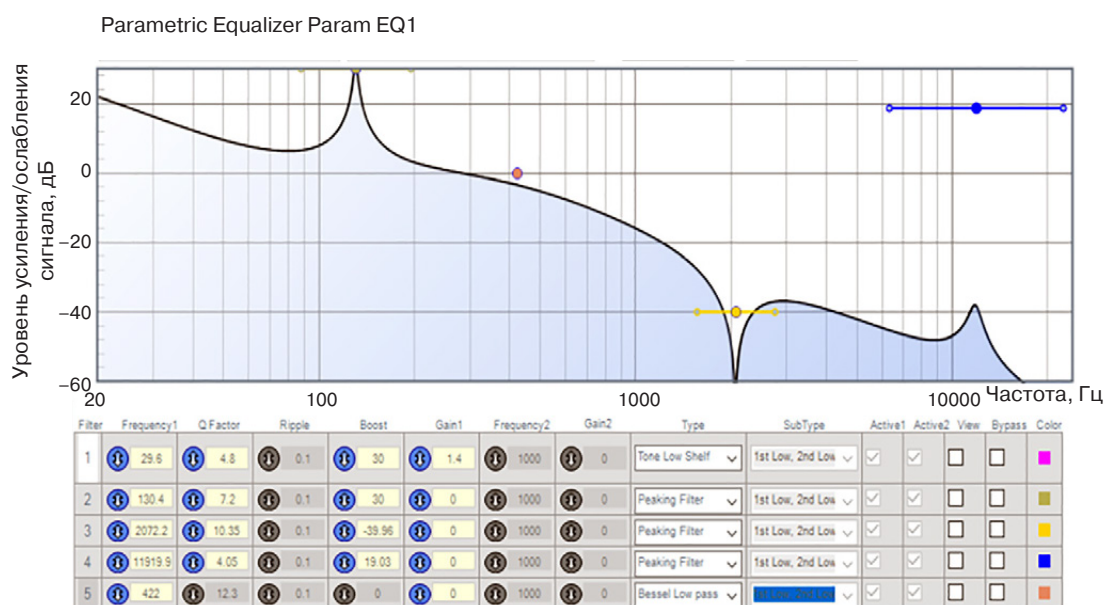
Исходя из полученных результатов анализа экспериментальных характеристик, можно сделать вывод, что электроакустическая АЧХ значительно изменяется в зависимости от настроек эквалайзера и фактически повторяет заданную в нем форму амплитудного спектра. Это представляет практический интерес при создании лабораторных аудиомониторов с равномерной АЧХ-коррекцией, а также для испытания медиаустройств и акустических систем при использовании многофункционального модуля в данном режиме [11].

3.3. Разработка и анализ характеристик ревербератора с тайминговой архитектурой

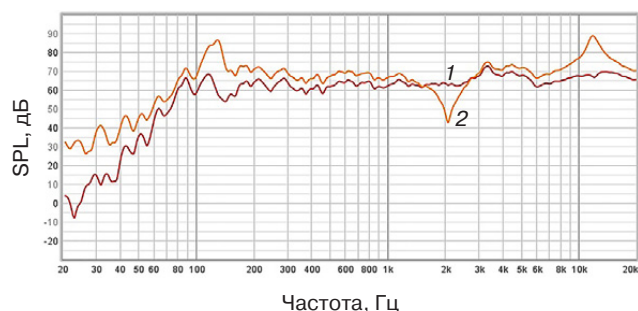
Анализ реверберационных характеристик проводится также в режиме независимого включения графического эквалайзера и аудиокомпрессора субмодуля (рис. 15, поз. 4). На физический вход аудиомодуля ADAU1701 через аудиоинтерфейс UMC404HD подается последовательность тестовых прямоугольных импульсов амплитудой 20 мВ с управляемой скважностью, генерируемых специально разработанным VST-плагином (синтезатором) в среде визуально-графического системного программирования Flowstone (рис. 23) [1]. Анализ характеристик ревербератора проводился на базе лабораторного стенда электроакустических измерений, схема которого приведена на рис. 8.



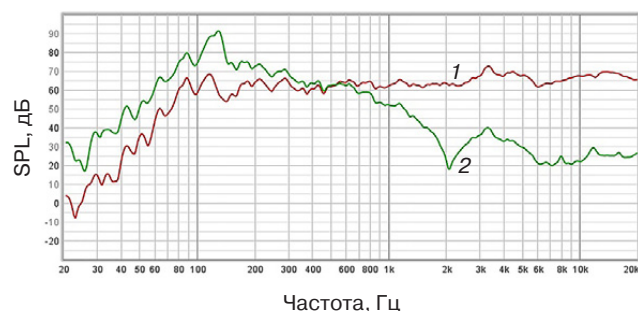
(a)



(б)



(в)



(г)

Рис. 22. Параметризация эквализационных характеристик субмодуля для двух вариантов конфигурации фильтров (а), (б) и соответствующие им электроакустические АЧХ (в), (г), измеренные микрофоном на выходе аудиомонитора (кривые 1 – АЧХ без эквализации, кривые 2 – после эквализации АЧХ)

В предлагаемой архитектуре субмодуля с тайминговой реверберацией [12] (рис. 24) сигнал проходит через НЧ-фильтр (поз. 5) с частотой среза 6 кГц, блок цифровой задержки 21.25 мс (поз. 6) в 1020 сэмплов (отсчетов), а также петлю обратной связи (поз. 4), обеспечивающую управление реверберацией 1–3 с по таймеру. В петле обратной связи расположено два элемента задержки (поз. 6) с задержкой в 4 отсчета, и один – с задержкой в 12 отсчетов с возможностью регулировки уровня проходящего сигнала. Задержанный сигнал проходит к выходу параллельно с исходным, будучи разреженным по частоте в 4 раза по сравнению с частотой дискретизации системы.

На рис. 25 показаны результаты исследования реверберационной аудиоканальной характеристики цифрового субмодуля с тайминговой архитектурой – осциллограммы, регистрируемые при помощи *Soundcard Oscilloscope* и аудиоинтерфейса UMC404HD, позволяющие оценить влияние задаваемых временных задержек, коэффициента передачи и ослабления петли обратной связи на формирование сигналов эхо-реверберации.

Анализируя полученные характеристики, можно наблюдать нестабильность амплитуды тестовых прямоугольных импульсов, составляющую до 5 мВ, что обусловлено наличием дифференциальной

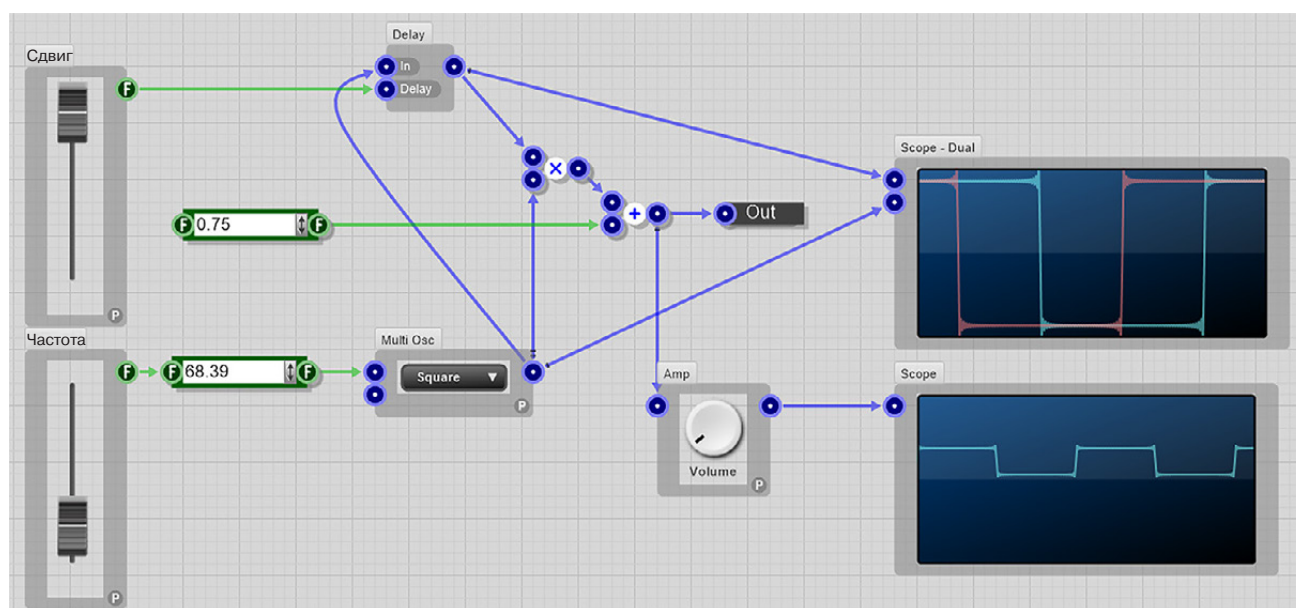


Рис. 23. VST-синтезатор тестовых прямоугольных импульсов

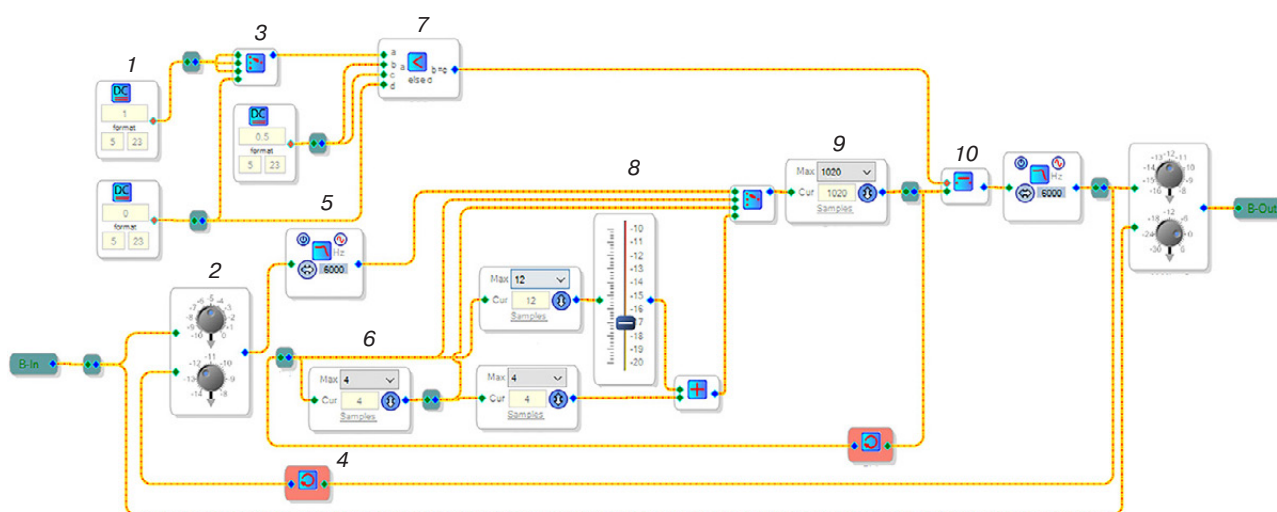


Рис. 24. Программно-определяемая архитектура схемы субмодуля таймингового ревербератора 4-го порядка: 1 – блоки генерации постоянного значения; 2 – микшер, определяющий глубину обратной связи; 3 – синхронный мультиплексор; 4 – блок создания обратной связи; 5 – НЧ-фильтр; 6 – блок задержки сигнала; 7 – компаратор; 8 – фейдер дополнительной задержки; 9 – основной блок задержки сигнала; 10 – цифровой ключ

цепи на выходе аудиоинтерфейса UMC404HD. Кроме того, к сигналу подмешиваются собственные шумы звуковой карты и ADSP-модуля величиной около -40 дБ. Из осциллограммы, приведенной на рис. 25б, видно, что при заданных параметрах предельного уровня реверберации: 0 дБ на задержанном исходном сигнале, -8 дБ на линии обратной связи (рис. 24, поз. 2), а также -10 дБ на фейдере громкости добавочной задержки (рис. 24, поз. 8), к основному сигналу 12.5 мВ добавились его копии, задержанные на 500 мс и 1 с, имеющие амплитуды 3.5 мВ и 1.0 мВ соответственно. В случае с ослабленным на -10 дБ сигналом в цепи реверберации

амплитуда исходного сигнала (рис. 25в) равна 17 мВ, а из фрагментарных составляющих осталась только первая – с амплитудой равной 2 мВ. В то же время при минимальных параметрах уровня обратной связи (рис. 25г): -14 дБ на цепь обратной связи (рис. 24, поз. 2), амплитуда исходного сигнала равна 17 мВ, а из дополнительных составляющих осталась только первая – с амплитудой равной 4 мВ.

Таким образом, блок цифровой реверберации с тайминговым управлением добавляет к исходному аудиосигналу его задержанные копии. Данный субмодуль позволяет регулировать глубину обратной связи и степень ее подмешивания к исходному сигналу,



(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 25. Осциллограммы исследования реверберационных аудиоканальных характеристик: (а) тестовый импульс-сигнал; (б) аудиосигнал с предельным уровнем реверберации, соответствующим преднастройкам схемы (рис. 24); (в) ослабленный на -10 дБ аудиосигнал в цепи реверберации; (г) сигнал с минимальным уровнем обратной связи, соответствующим преднастройкам схемы (рис. 24)

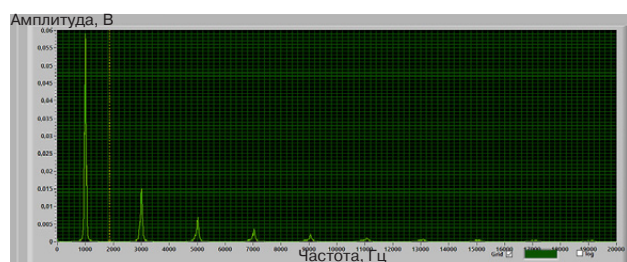
что используется для имитации характеристик диффузного векторного поля архитектурной акустики, представляет интерес при создании фантомных эффектов реверберации, а также для изучения свойств аудиосигнала и его качественного воспроизведения при заданных условиях среды распространения [13].

3.4. Анализ и параметризация характеристик сигнального сатуратора

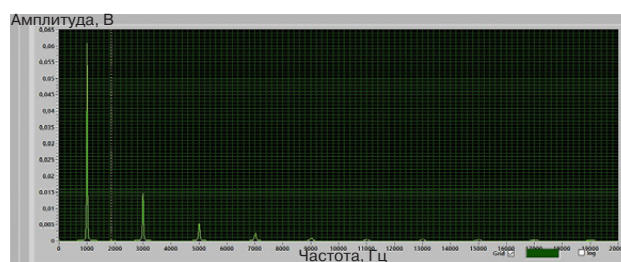
Параметризация и анализ характеристик блока сатурации «V Chor1» субмодуля эффектов (рис. 15, поз. 3) проводится при помощи синусоидального сигнала в спектральной области. Встроенная надстройка НЧ-генерации «LFO» (low-frequency oscillation) определяет время задержки, которое модулирует НЧ-генератор, и имеет три режима работы – «Slow» (медленный, т.е. с наибольшим временем задержки), «Normal» (средний), «Fast» (быстрый или с наименьшим временем задержки). При этом надстройка «Feedback» определяет степень подмешивания задержанного сигнала к исходному: «Light» (легкая,

т.е. подмешивается малая часть), «Normal» (средняя), «Heavy» (перенасыщенная). Режим сигнальной сатурации субмодуля эффектов представляет практический интерес при разработке и тестировании цифровых медиаустройств, обеспечивающих насыщение исходного сигнала («саундчека») нечетными формантами, имитируя эффект нелинейных искажений транзисторных каскадов аналоговых аудиотрактов [4]. Блок сатурации представляет из себя цепь ПОС и НЧ-модулятор времени задержки. Управление настройками режимов в схеме осуществляется с помощью микшера громкости «N × M Mixer1» на выходе субмодуля (рис. 15, поз. 7).

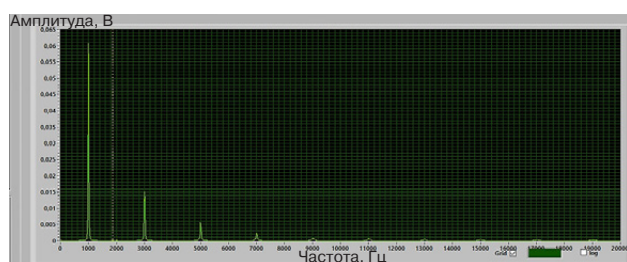
Как можно видеть из спектральных характеристик, приведенных на рис. 26, сатурация добавляет к спектру тестового (исходного) сигнала с частотой 1 кГц кратные нечетные субгармоники. На анализаторе спектра включен режим удержания максимального значения, поэтому снимок спектра выполнялся спустя минуту после начала функционирования субмодуля. Результаты анализа характеристик сатуратора приведены в таблице.



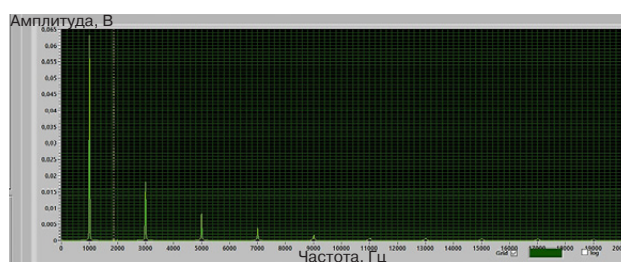
(а)



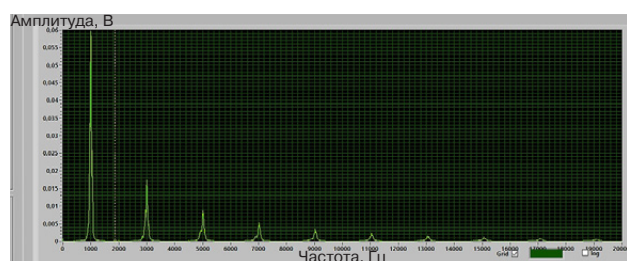
(б)



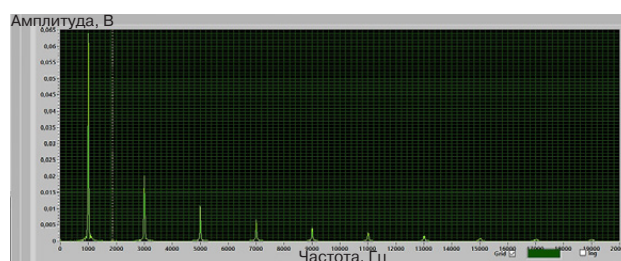
(в)



(г)



(д)



(е)

Рис. 26. Спектрограммы режима сигнальной сатурации:

(а) выходного сигнала при установленной надстройке «Feedback-Light»; (б) выходного сигнала при установленной надстройке «Feedback-Heavy»; (в) выходного сигнала при установленной надстройке «LFO-Slow»; (г) выходного сигнала при установленной надстройке «LFO-Fast»; (д) выходного сигнала при надстройках «Feedback-Light» и «LFO Slow»; (е) выходного сигнала при надстройках «Feedback-Heavy» и «LFO Fast»

Таблица. Экспериментальные характеристики сатуратора при заданных надстройках

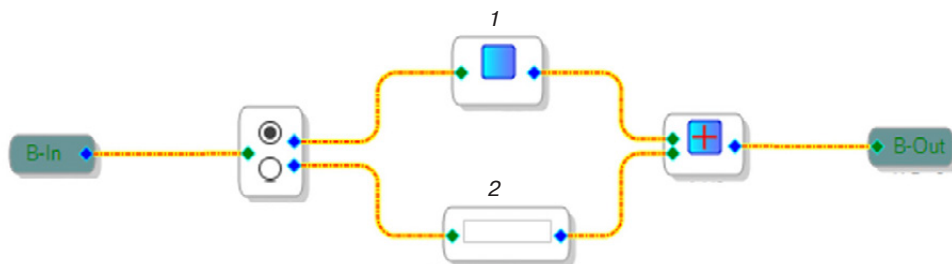
Надстройка (режим работы) сатуратора	«Feedback-Light»	«Feedback-Heavy»	«LFO-Slow»	«LFO-Fast»	«Feedback-Light», «LFO-Slow»	«Feedback-Heavy», «LFO-Fast»
Амплитуда тестового сигнала с частотой 1 кГц, мВ	60	60	60	60	60	60
Амплитуда 1-й субгармоники, мВ	15	15	15	18	17	20
Амплитуда 2-й субгармоники, мВ	7	5	6	8	9	11
Ширина частотной полосы, несущей на уровне 5 мВ, Гц	200	100	100	50	200	50
Количество субгармоник с уровнем не меньше 1 мВ	6	5	5	5	9	8

Анализируя данные, приведенные в таблице, можно отметить, что работа сатуратора в комбинированном режиме «Feedback-Light», «LFO Slow», дает наибольшее число субгармоник и наибольшую ширину полосы исходного сигнала. Режим «Feedback-Heavy», «LFO-Fast» дает наибольшую амплитуду несущей и первых двух субгармоник, а также наименьшую ширину формируемой частотной полосы на уровне 5 мВ. Таким образом, блок сатурации добавляет к спектру исходного сигнала нечетные гармоники, расширяя формантную полосу и увеличивая спектральную плотность мощности сигнала. При этом есть возможность регулировать число субгармоник и их амплитуду. Режим сигнальной сатурации позволяет создавать эффекты фонотерцивой/фонооктавной полифонии, что часто применяется при обработке аудиосигналов реального времени, в т.ч. электроакустических измерениях при анализе распределения интенсивности спектрально насыщенного диффузного звукового поля [14].

4. РАЗРАБОТКА, АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СУБМОДУЛЯ АВТОКОРРЕКЦИИ АЧХ

Ввиду неравномерности фазово-динамических характеристик аудиомониторов, а также АЧХ диффузного пространства распространения звукового поля, в т.ч. вызванной волновой дисперсией,

их коррекция, как правило, обеспечивается с помощью наложения компенсационных фильтров на искаженные участки АЧХ [4]. Равномерность АЧХ крайне важна для осуществления корректной аудиосигнальной обработки и электроакустических измерений. С помощью предложенного авторами решения архитектурного построения схемы автокоррекции АЧХ представляется возможность осуществлять выравнивание частотно-динамического и фазового баланса динамиков ввиду особенностей неравномерности АЧХ диффузного пространства, например, студии звукозаписи [12]. Для создания адаптивного фильтра в схеме субмодуля автокоррекции АЧХ используется разработанный блок «AutoEQ», позволяющий автоматически выстроить корректирующую цепочку согласованных фильтров по загруженным в него численным значениям АЧХ. Экспериментальная схема синтеза адаптивной параметризации и измерения характеристик многофункционального аудиомодуля в режиме автокоррекции АЧХ приведена на рис. 27. При этом измерительный микрофон Behringer ECM8000 устанавливается напротив центра динамика аудиомонитора на осевом расстоянии в заданной точке регистрации так, чтобы уровень звукового давления – «SPL» (sound pressure level) – был не ниже 75 дБ, а аудиомодуль включается в аудиотракт между выходом аудиоинтерфейса и входом активного студийного монитора.

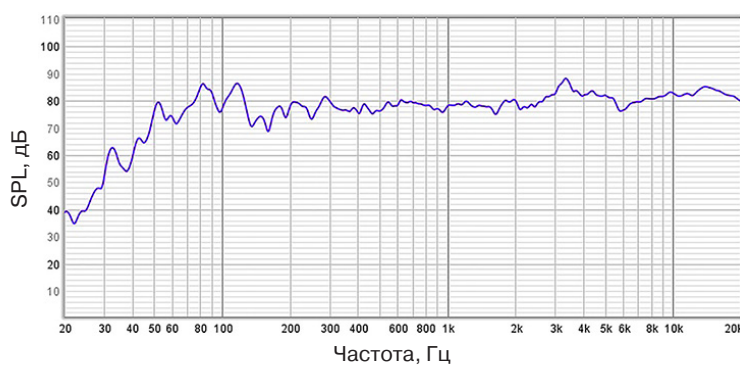
**Рис. 27.** Программно-определяемая архитектура схемы субмодуля автокоррекции АЧХ:

1 – блок автокоррекции АЧХ «Auto EQ1»; 2 – субмодуль автоматического подавления ПОС «Feedback Attenuator»

Процедура автокоррекции АЧХ монитора состоит в измерении АЧХ диффузного пространства и создания из него противовесной адаптивной АЧХ фильтра коррекции, позволяющей нивелировать динамический диапазон электроакустического тракта в предельном размахе ± 10 –15 дБ за счет фазо-динамической компенсации в заданном объеме звукового поля [8]. В пакете *RoomEQWizard* на выходе аудиointерфейса генерируется тестовый ЛЧМ-сигнал типа «Sweep» в полосе 0.02–20 кГц. На основании данных, полученных программой с измерительного микрофона Behringer ECM8000 (АЧХ микрофона,

как и аудиointерфейса, компенсируется калибровочным файлом), строится акустическая АЧХ/ФЧХ (фазо-частотная характеристика) помещения, интегрирующая в себя АЧХ/ФЧХ сигнального аудиотракта, включая студийные аудиомониторы (рис. 28а), которую можно экспортировать из программы в виде массива данных (частота, амплитуда, фаза) в формате «.txt» (рис. 28б).

Для загрузки данного файла в *SigmaStudio* в нем необходимо изменить заголовок внутри файла экспорта так, как представлено на рис. 28в. Далее, в блок AutoEQ субмодуля автокоррекции



(а)

```
* Measurement data measured by REW V5.20.9
* Source: ASIO UMC ASIO Driver, In 1
* Format: 256k Log Swept Sine, 1 sweep at -12,0 dBFS with no timing reference
* Dated: 07.12.2022 15:57:29
* REW Settings:
* C-weighting compensation: Off
* Target level: 75.0 dB
* Note:
* Measurement: дек 7
* Smoothing: None
* Frequency Step: 1/24 octave
* Start Frequency: 1.000 Hz
*
* Freq(Hz), SPL(dB), Phase(degrees)
1.000000, 34.963, -124.7207
1.030000, 34.536, -124.7025
...
...
19000.000000, 81.612, 19.5586
19500.000000, 80.173, 22.6615
```

(б)

```
"Sensitivity Excess Phase - dB SPL/watt (8 ohms, @0.50 meters) (High)"
"Hz" "Mag (dB)" "deg"
1.000000, 34.963, -124.7207
1.030000, 34.536, -124.7025
...
...
19000.000000, 81.612, 19.5586
19500.000000, 80.173, 22.6615
```

(в)

Рис. 28. АЧХ диффузного пространства: (а) в произвольной точке распределения звукового поля лабораторной студии сигнальной радиоакустики, аудиовизуальных систем и технологий кафедры радиоволновых процессов и технологий МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА); (б) экспортируемый массив данных АЧХ/ФЧХ, соответствующий кривой на рисунке (а); (в) корректировка формата экспортирования данных из пакета *RoomEQWizard* в среду *SigmaStudio*

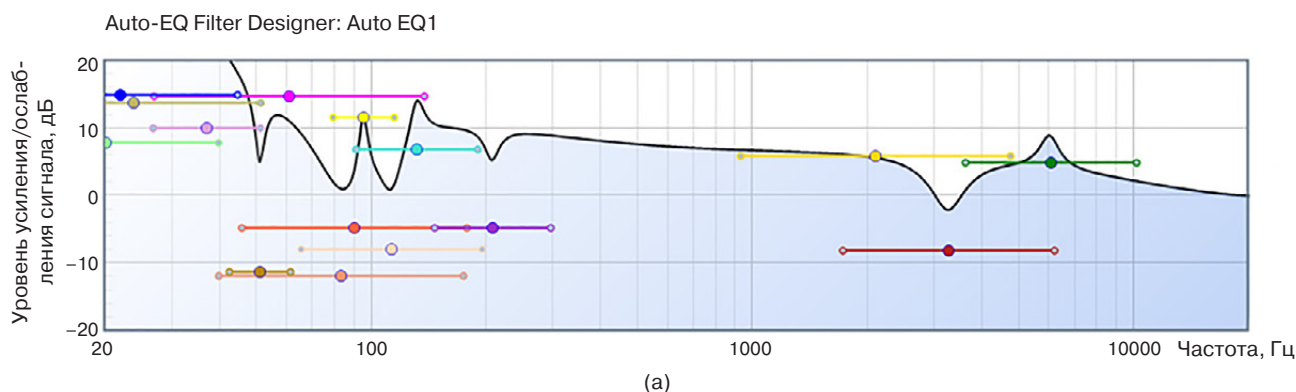
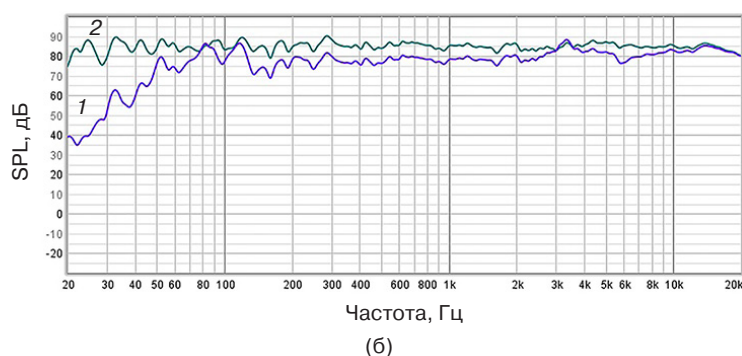


Рис. 29. Экспериментальные результаты автокоррекции АЧХ в произвольном координатном объеме диффузного пространства студийной лаборатории: (а) построение компенсационной АЧХ/ФЧХ адаптивного фильтра на базе блока «AutoEQ»; (б) АЧХ до (кривая 1) и после (кривая 2) автокоррекции



загружается экспортный файл, по которому автоматически рассчитывается и строится АЧХ адаптивной системы фильтрации (рис. 29а).

Интерфейс данного блока предусматривает возможность выбора числа фильтров (до 15), а также ручную преднастройку/перестройку их параметров. На рис. 29б приведены экспериментальные кривые результатов автокоррекции АЧХ, формируемые submodule «AutoCorrection». Предельное отклонение динамического диапазона после автокоррекции лежит в пределах ± 10 дБ в области до 100 Гц и ± 5 дБ – в полосе 0.1–20 кГц. При этом для различных условий автокомпенсации неравномерности АЧХ диффузного пространства за счет коррекции АЧХ аудиомониторов предусмотрен режим автоизмерений и загрузки файла данных в аудиопроцессор ADAU1701.

Как видно из кривых, приведенных на рис. 29б, автокоррекция позволила поднять «завал» динамического уровня в полосе ниже 80 Гц почти на 40 дБ, а также повысить средний уровень сигнала в области провалов, например, на частоте 1 кГц, приблизительно на 7 дБ, не затронув при этом пиковые значения, например, на частоте 80 Гц и 3.3 кГц. Таким образом, для представленных измерений неравномерность АЧХ составляет ± 10 дБ в области до 100 Гц и ± 5 дБ – в полосе 0.1–20 кГц, что делает АЧХ диффузного пространства в некотором объеме звукового поля относительно равномерной

при электроакустической настройке студий и залов, позволяя производить тестирование медиасистем, а также настройку и коррекцию аудиооборудования без вносимых искажений [12].

5. РАЗРАБОТКА И СИГНАЛЬНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СУБМОДУЛЯ АВТОКОМПЕНСАЦИИ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОЙ ПОС

Как известно, явление электроакустической ПОС приводит к процессу автогенерации, вызванной формированием режима резко нарастающего фазоамплитудного баланса между микрофоном и динамиком аудиомонитора (строго говоря, определяется условиями среды распространения звука, расстоянием между источником и приемником звука, а также их резонансными частотами, диаграммами направленности), источником которых служат собственные шумы электроакустического канала [5]. Подавление электроакустической ПОС осуществляется нарушением фазодинамического баланса системы путем инициирования селективного фазового дрейфа (рендовой фазоперестройки сигнала на критичных – резонансных частотах) или же путем создания узкополосной режекторной фильтрации (динамического подавления сигнала на критических частотах) [15]. Схема включения submodule автокомпенсации электроакустической

ПОС приведена на рис. 30. При этом в submodule автокоррекции на переключателе « $1 \times N - 3$ » необходимо выбрать «нижнее» положение, соответствующее режиму автоподавления акустической ПОС – Vox-submodule «Auto EQ1».

Экспериментальная схема лабораторного исследования аудиомодуля в режиме автокомпенсации ПОС предполагает следующую маршрутизацию аудиоканала (рис. 31): от измерительного микрофона Behringer ECM8000 аудиосигнал, наводимый в диффузное пространство собственными шумами аудиотракта в диапазоне от -50 до -40 дБ с монитора, поступает на вход ADAU1701, где проходит через схему submodule автокомпенсации ПОС «Auto EQ1». Далее сигнал направляется на вход аудиоинтерфейса UMC404HD, с выхода которого идет на аудиомонитор Behringer K8. При этом микрофон расположен на главной линии диаграммы направленности динамика аудиомонитора на расстоянии 1 м. На входе аудиоинтерфейса установлено

значение чувствительности 10 дБ для того, чтобы микрофон уловил собственные шумы электроакустического канала.

При помощи включенного в аудиотракт submodule «Auto EQ1» происходит компенсация (режекция) инициируемых частотных резонансов, после чего селективно ослабленные сигналы поступают на вход аудиоинтерфейса, где происходит регистрация осциллограммы при помощи *Soundcard Oscilloscope*.

Программно-определяемая конфигурация схемы submodule режекторной автокомпенсации ПОС (рис. 32) представляет собой систему, состоящую из 18 последовательно соединенных блоков автоматической фильтрации. Эта система обеспечивает селекцию на номинально установленной комбинации частот 31, 63, 87, 125, 175, 250, 350, 500, 700 Гц и 1, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11.2, 16 кГц с управляемыми полосами, обеспечивающими перекрытие частотного диапазона 0.02–18 кГц [15].

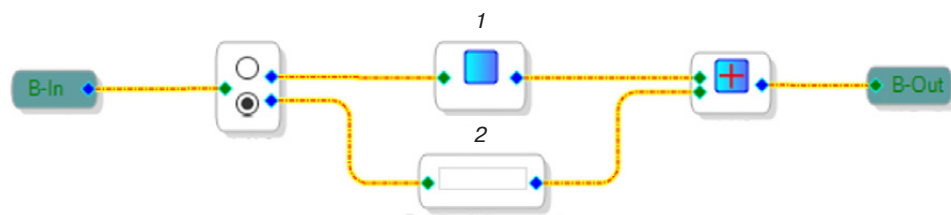


Рис. 30. Программно-определяемая архитектура схемы включения submodule автоподавления акустической ПОС: 1 – блок автокоррекции АЧХ «Auto EQ1»; 2 – submodule автоматического подавления ПОС «Feedback Attenuator»

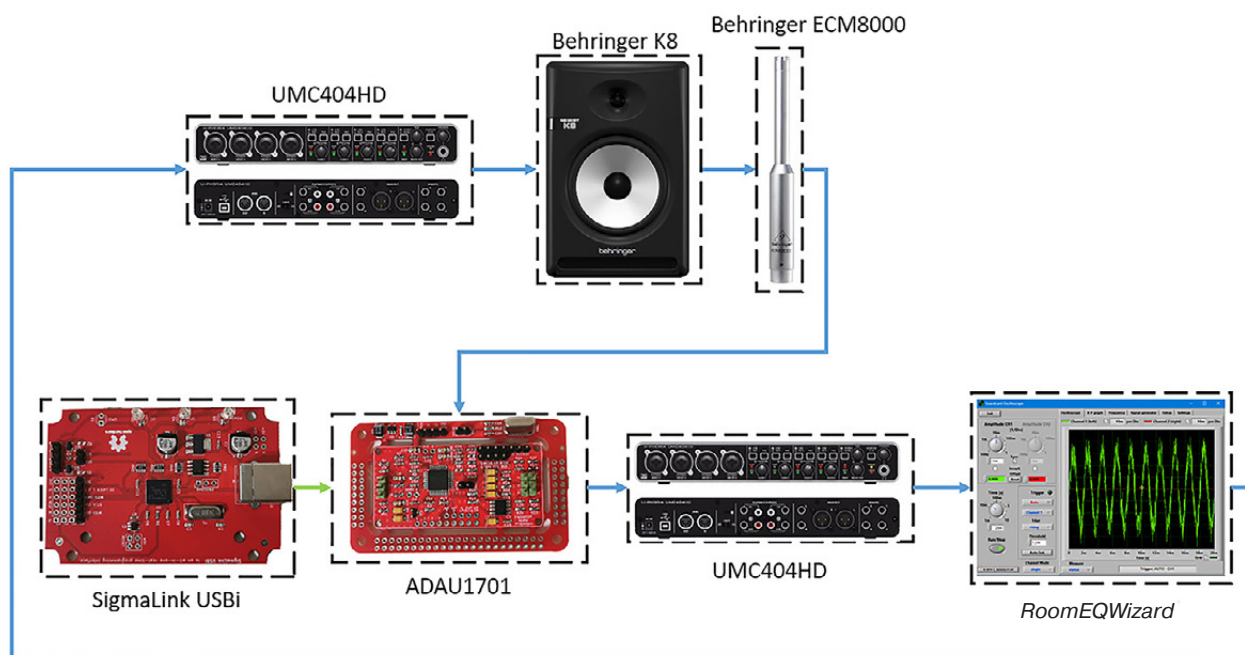


Рис. 31. Схема экспериментального исследования многофункционального ADSP-модуля в режиме включения submodule автокомпенсации электроакустической ПОС

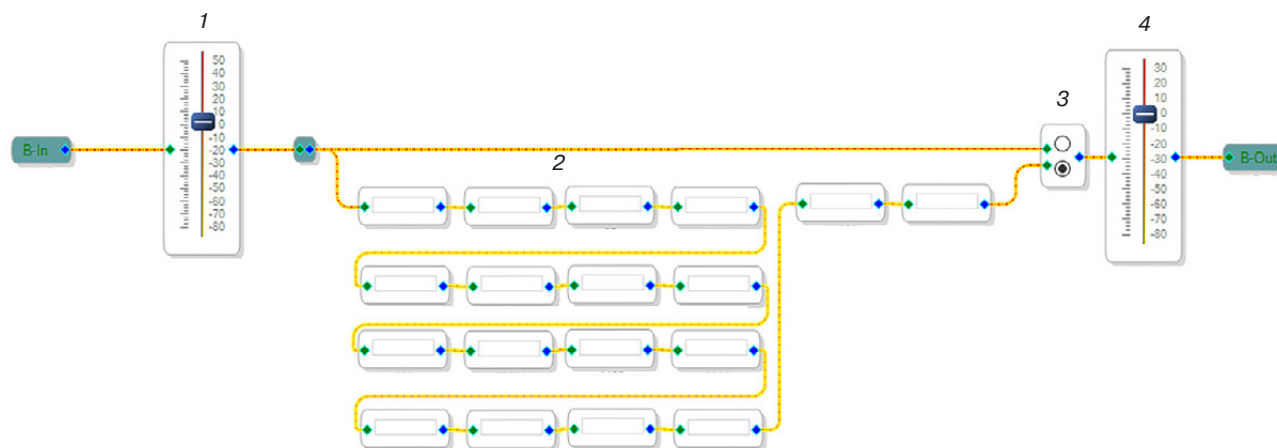


Рис. 32. Программно-определяемая архитектура схемы субмодуля режекторной автокомпенсации ПОС:

1 – фейдер входной громкости «Single 1_2»; 2 – цепь режекторных фильтров;
3 – цифровой коммутатор «N × 1 – 1_2»; 4 – фейдер выходной громкости «Single 2_2»

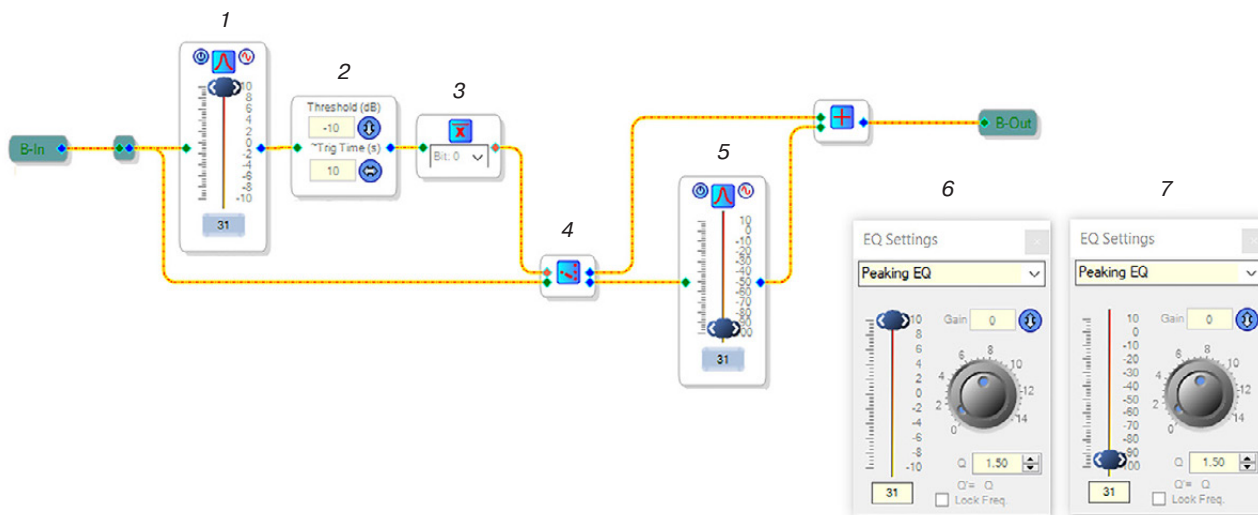


Рис. 33. Схема блока полосового автослежения акустической ПОС: 1 – ПФ «Mid EQ3_19»; 2 – блок обнаружения сигнала «Signal Detection1_21»; 3 – блок сравнения с нулем «ZeroComp1_21»; 4 – демультиплексор «DmX2_19»; 5 – ПФ «Mid EQ2_21»; 6 – окно настроек ПФ «Mid EQ3_19»; 7 – окно настроек ПФ «Mid EQ2_21»

Особое внимание следует обратить на блок полосового автослежения акустической ПОС (рис. 33), состоящий из полосового фильтра (ПФ), блока обнаружения резонансного сигнала (возбуждаемого из шума), превышающего задаваемый порог, блока сравнения с нулевым уровнем, демультиплексора, а также режекторного фильтра (РФ).

Иницируемый тестовый сигнал (наводимый шум) поступает на вход ПФ (рис. 33, поз. 1), после чего попадает на элемент «Signal Detection1_21» (рис. 33, поз. 2), проверяющий, превышает ли его амплитуда заданный порог –10 дБ, выбранный исходя из необходимости подавления резонанса прежде, чем он перекроет полезный сигнал. В случае невыполнения условия превышения данный элемент формирует ненулевое значение на выходе, которое поступает на вход блока сравнения с нулем (рис. 33, поз. 3), после чего входной сигнал проходит без изменений. Однако, если

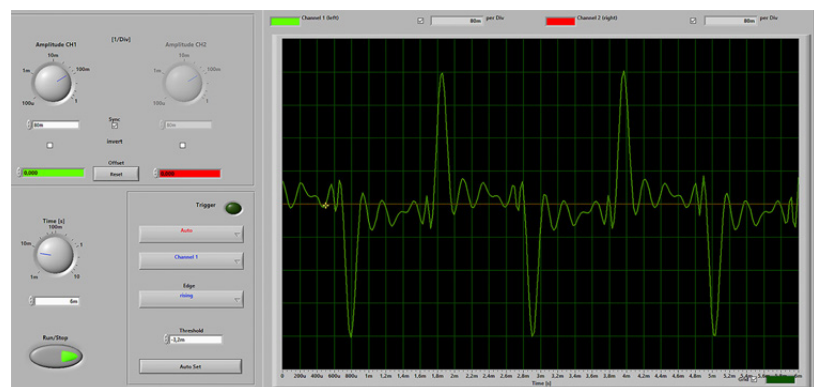
аудиосигнал после фильтра (рис. 33, поз. 1) превышает заданный уровень –10 дБ, то он подается на режекторный фильтр (рис. 33, поз. 5) с неизменной частотой при регулируемом уровне режекторного ослабления сигнала в диапазоне от 0 дБ до –100 дБ.

В реализуемом способе режекторной автокомпенсации ПОС режекторные фильтры срабатывают только при возникновении резонанса и через установленное пользователем время 0–10 с, после чего сбрасываются, что позволяет системе не оказывать значительного влияния на АЧХ динамика. Частоты и добротность фильтров (рис. 33, поз. 6 и 7) обеспечивают полное перекрытие всего рабочего частотного диапазона 0.02–20 кГц при входном динамическом диапазоне от –50 до 80 дБ.

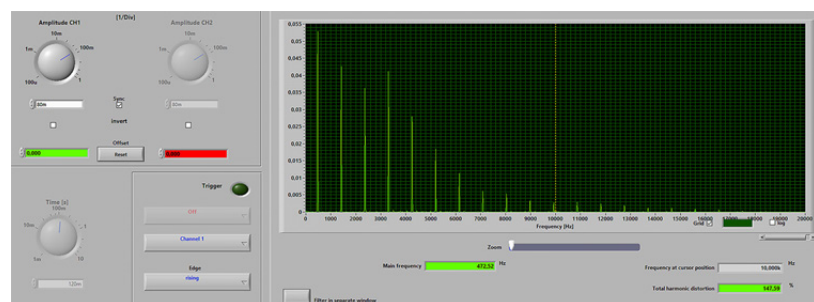
При исследовании субмодуля «Auto EQ1» на входе схемы формируется тестовый сигнал в виде собственных шумов аудиоканала с уровнем от –50 до –40 дБ.

На рис. 34 приведены экспериментальные спектрально-временные характеристики сигнальной автокомпенсации электроакустической ПОС, иллюстрирующие режим селективного подавления инициируемых частотно-резонансных всплесков до уровня 2.75 мВ (ниже динамического уровня собственных шумов аудиотракта). При этом микрофон продолжает улавливать полезный звуковой

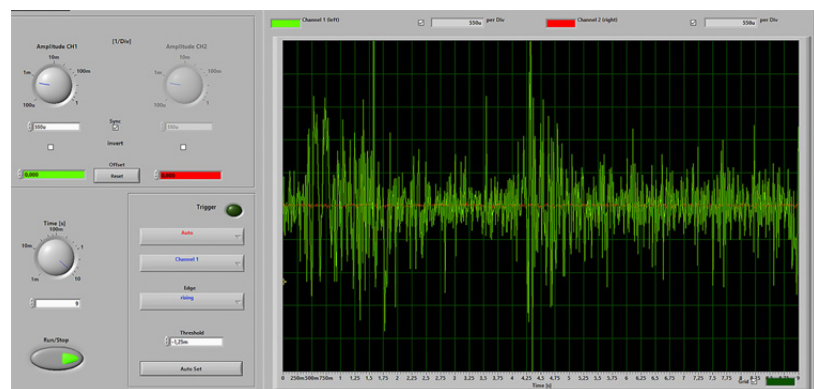
сигнал и шумы на любых других частотах, в т.ч. спектральные форманты, не попадающие в область неустойчивого режима системы. Если резонанс не возникает в течение 10 с, режекторный фильтр отключается, что позволяет избежать «режекторных искажений» АЧХ, вызванных случайными (единовременными) резонансами. Субмодуль режекторной автокомпенсации электроакустической ПОС



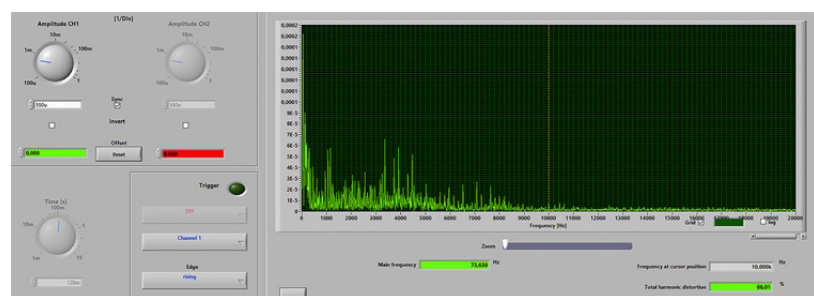
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 34. Частотно-временные характеристики результатов исследования субмодуля режекторной автокомпенсации ПОС: (а) осциллограмма устойчивого режима формирования акустической ПОС (без автокомпенсации); (б) амплитудный спектр, соответствующий осциллограмме (а); (в) осциллограмма устойчивого режима автоподавления ПОС; (г) амплитудный спектр, соответствующий осциллограмме (в)

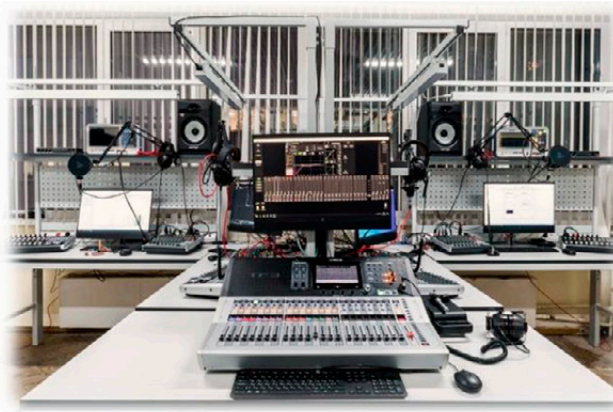
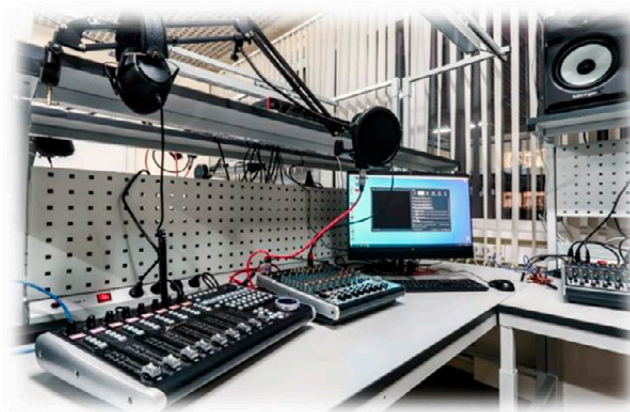


Рис. 35. Учебно-научная лаборатория сигнальной радиоакустики, аудиовизуальных систем и технологий РТУ МИРЭА и ВГТРК

представляет практический интерес при тестировании студийных медиасистем на устойчивость по критерию Найквиста [4], а также предотвращает перегрузку аудиомониторов из-за эффекта электроакустической ПОС. Действительно, анализируя частотно-временные характеристики, приведенные на рис. 34а, 34б, следует обратить внимание на наличие периодического сигнала амплитудой 240 мВ, состоящего из 7 гармонических составляющих уровнем выше 10 мВ, в то время как характеристики, представленные на рис. 34в, 34г, демонстрируют наличие только шумового сигнала амплитудой 2.75 мВ без ярко выраженных частотных составляющих.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В среде визуально-графического программно-архитектурного ADSP-проектирования *SigmaStudio* разработан и исследован многофункциональный аудиосигнальный модуль звукообработки на процессоре ADAU1701, позволяющий тестировать медиасистемы, исследовать характеристики устройств звукообработки, производить отладку и коррекцию АЧХ аудиомониторов, а также осуществлять обработку аудиосигналов и имитацию условий диффузной среды распространения звукового поля в ограниченном пространстве. Электроакустические и внутриканальные аудиосигнальные измерения аудиомодуля производились с помощью специально построенных схем экспериментальных стендов и автоматизированного измерительного программного обеспечения *RoomEQWizard* и *Soundcard Oscilloscope* на базе студийной лаборатории сигнальной радиоакустики, аудиовизуальных систем и технологий Института радиоэлектроники и информатики РТУ МИРЭА и ВГТРК⁷ (рис. 35).

На базе ADSP-процессора ADAU1701 создана программная архитектура многофункционального аудиомодуля для медиатестирования и отладки аудиосигнальных систем и устройств. На основе стендовых лабораторных исследований получены экспериментальные характеристики субмодулей многофункционального устройства, позволяющие в заданных спектрально-динамическом и пространственно-временном диапазонах осуществлять тестирование медиаустройств:

- субмодуль балансной маршрутизации позволяет в 20 раз снизить влияние наводимых на аудиоканал шумов, что позволяет проводить калибровку звуко снимающих аудиоустройств;
- субмодуль аудиосигнальной обработки обеспечивает компрессионную характеристику с динамическим диапазоном от -27 до 18.6 дБ с возможностью эквализационной параметризации в диапазоне 0.04 – 18 кГц при задаваемых добротностях и уровнях аттенюации/усиления фильтров; реверберационную характеристику в диапазоне 0.5 – 3000 мс; аудиоканальное кросс-разделение на поддиапазоны 20 – 250 Гц, 0.25 – 3 кГц, 3 – 20 кГц с возможностью регулировки АЧХ в динамическом диапазоне от -30 до 30 дБ, что представляет интерес при панорамной и частотной балансировке аудиосистем;
- субмодуль автокоррекции АЧХ/ФЧХ аудиомониторов позволяет снизить на 40 дБ динамическую неравномерность АЧХ; субмодуль автоподавления электроакустической ПОС обеспечивает режекторное формантоподавление до -100 дБ при входном динамическом диапазоне от -50 до 80 дБ, не оказывая при этом влияния на АЧХ, поскольку каждый фильтр системы работает независимо.

⁷ ФГУП «Всероссийская государственная телевизионная и радиовещательная компания». <https://vgtrk.ru/>. Дата обращения 20.02.2023. [Federal State Unitary Enterprise “All-Russia State Television and Radio Broadcasting Company”] (in Russ.). <https://vgtrk.ru/>. Accessed February 20, 2023.]

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках НИР «Радиоинформационные системы и радиоэлектронные технологии» (шифр 170-ИРИ).

ACKNOWLEDGMENTS

The study was carried out within the framework of the research on “Radio-information systems and radio-electronic technologies” (code 170-IRI).

Вклад авторов

А.В. Геворский – параметрический анализ и исследование многофункционального аудиомодуля на базе ADSP-процессора.

М.С. Костин – разработка архитектурной конфигурации многофункционального ADSP-модуля.

К.А. Бойков – разработка программы испытаний медиатестирования сигнальных аудиоустройств.

Authors' contributions

A.V. Gevorsky – parametric analysis and research of a multifunctional audio module based on an ADSP processor.

M.S. Kostin – development of an architectural configuration of a multifunctional ADSP module.

K.A. Boikov – development of a test program for media testing of signal audio devices.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костин М.С. Сигнальная радиоакустика, аудиовизуальные системы и технологии. В сб.: *Наука РТУ МИРЭА на современном этапе: сборник научных трудов Юбилейной научно-технической конференции, посвященной 75-летию РТУ МИРЭА*. М.: РТУ МИРЭА; 2022. С. 325–328.
2. Афанасьев А.А., Рыболовлев А.А., Рыжков А.П. *Цифровая обработка сигналов*. М.: Горячая линия – Телеком; 2019. 356 с.
3. Steiglitz K. *A Digital Signal Processing Primer: with Applications to Digital Audio and Computer Music*. NY, USA: Dover Publications Inc.; 2020. 320 p.
4. Pirkle W.C. *Designing Audio Effect Plugins in C++: for AAX, AU, and VST3 with DSP Theory*. 2nd ed. NY, USA: Routledge; 2019. 704 p.
5. Ковалгин Ю.А., Вологдин Э.И. *Аудиотехника*. М.: Горячая линия – Телеком; 2013. 742 с.
6. Петленко Д.Б., Ярлыков А.Д., Бойков К.А. *Аналого-цифровые преобразователи сигнальных аудиointерфейсов*. М.: Реглет; 2023. 65 с.
7. Попов О.Б., Рихтер С.Г. *Цифровая обработка сигналов в трактах звукового вещания*. М.: Горячая линия – Телеком; 2012. 342 с.
8. Ковалгин Ю.А., Вахитов Ш.Я. *Акустика*. М.: Горячая линия – Телеком; 2022. 660 с.
9. Zölzer U. *Digital Audio Signal Processing*. 2nd ed. Chippenham, England: Wiley; 2008. 340 p.
10. Self D. *Small Signal Audio Design*. 3rd ed. NY, USA: CRC Press; 2020. 784 p.
11. Cipriani A., Giri M. *Electronic Music and Sound Design: Theory and Practice with Max 8. V. 2*. 3rd ed. Rome, Italy: ConTempoNet; 2020. 748 p.
12. Kamenov A. *Digital Signal Processing for Audio Applications*. 2nd ed. Amazon. Kindle edition. RecordingBlogs; 2014. 348 p.
13. Collins K. *Studying Sound: A Theory and Practice of Sound Design Hardcover*. London, England: The MIT Press; 2020. 248 p.
14. Reiss J.D., McPherson A. *Audio Effects. Theory, Implementation and Application*. Boca Raton, USA: CRC Press; 2008. 368 p.
15. Петленко Д.Б., Ярлыков А.Д., Бойков К.А. *Цифровые методы секвенсорной эквализации аудиосигналов радиоакустических систем*. М.: Реглет; 2023. 109 с.

REFERENCES

1. Kostin M.S. Signal radio acoustics, audiovisual systems and technologies. In: *Science of RTU MIREA at the Present Stage: Collection of Scientific Papers of the Anniversary Scientific and Technical Conference Dedicated to the 75th Anniversary of RTU MIREA*. Moscow: RTU MIREA; 2022. P. 325–328 (in Russ.).
2. Afanas'ev A.A., Rybolovlev A.A., Ryzhkov A.P. *Tsifrovaya obrabotka signalov (Digital Signal Processing)*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2019. 356 p. (in Russ.).
3. Steiglitz K. *A Digital Signal Processing Primer: with Applications to Digital Audio and Computer Music*. NY, USA: Dover Publications Inc.; 2020. 320 p.
4. Pirkle W.C. *Designing Audio Effect Plugins in C++: for AAX, AU, and VST3 with DSP Theory*. 2nd ed. NY, USA: Routledge; 2019. 704 p.
5. Kovalgin Yu.A., Vologdin E.I. *Audiotekhnika (Audio Engineering)*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2013. 742 p. (in Russ.).
6. Petlenko D.B., Yarlykov A.D., Boikov K.A. *Analogo-tsifrovye preobrazovateli signal'nykh audiointerfeisov (Analog-to-Digital Converters of Signal Audio Interfaces)*. Moscow: Reglet; 2023. 65 p. (in Russ.).
7. Popov O.B., Rikhter S.G. *Tsifrovaya obrabotka signalov v traktakh zvukovogo veshchaniya (Digital Signal Processing in Audio Broadcasting Paths)*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2012. 342 p. (in Russ.).
8. Kovalgin Yu.A., Vakhitov Sh.Ya. *Akustika (Acoustics)*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2022. 660 p. (in Russ.).
9. Zölzer U. *Digital Audio Signal Processing*. 2nd ed. Chippenham, England: Wiley; 2008. 340 p.

10. Self D. *Small Signal Audio Design*. 3rd ed. NY, USA: CRC Press; 2020. 784 p.
11. Cipriani A., Giri M. *Electronic Music and Sound Design: Theory and Practice with Max 8. V. 2*. 3rd ed. Rome, Italy: ConTempoNet; 2020. 748 p.
12. Kamenov A. *Digital Signal Processing for Audio Applications*. 2nd ed. Amazon. Kindle edition. RecordingBlogs; 2014. 348 p.
13. Collins K. *Studying Sound: A Theory and Practice of Sound Design Hardcover*. London, England: The MIT Press; 2020. 248 p.
14. Reiss J.D., McPherson A. *Audio Effects. Theory, Implementation and Application*. Boca Raton, USA: CRC Press; 2008. 368 p.
15. Petlenko D.B., Yarlykov A.D., Boikov K.A. *Tsifrovye metody sekvensornoi ekvalizatsii audiosignalov radioakusticheskikh system (Digital Methods of Sequencer Equalization of Audio Signals of Radioacoustic Systems)*. Moscow: Reglet; 2023. 109 p. (in Russ.).

Об авторах

Геворский Андрей Владимирович, студент, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: x33590@gmail.com. <http://orcid.org/0009-0001-9734-7515>

Костин Михаил Сергеевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой радиоволновых процессов и технологий, заместитель директора Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, SPIN-код РИНЦ 5819-2178, <http://orcid.org/0000-0002-5232-5478>

Бойков Константин Анатольевич, к.т.н., доцент, кафедра радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bojkov_k@mirea.ru. Scopus Author ID 57208926258, SPIN-код РИНЦ 2014-6951, <http://orcid.org/0000-0003-0213-7337>

About the authors

Andrey V. Gevorsky, Student, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: x33590@gmail.com. <http://orcid.org/0009-0001-9734-7515>

Mikhail S. Kostin, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Radio Wave Processes and Technologies, Deputy Director, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, RSCI SPIN-code 5819-2178, <http://orcid.org/0000-0002-5232-5478>

Konstantin A. Boikov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bojkov_k@mirea.ru. Scopus Author ID 57208926258, RSCI SPIN-code 2014-6951, <http://orcid.org/0000-0003-0213-7337>