

---

---

**АКУСТИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ.  
ШУМЫ И ВИБРАЦИИ**

---

---

УДК 534.83

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО  
АЛГОРИТМА АКТИВНОГО ГАШЕНИЯ ЗВУКА  
С БЫСТРОЙ АДАПТАЦИЕЙ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ**

© 2025 г. А. В. Львов<sup>а,\*</sup>, В. А. Карасева<sup>а</sup>, А. А. Родионов<sup>а</sup>, А. Г. Окунев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова  
Российской академии наук, ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603950 Россия

\*e-mail: lvov@ipfran.ru

Поступила в редакцию 22.04.2024 г.

После доработки 19.12.2024 г.

Принята к публикации 24.12.2024 г.

Предложен способ построения системы активного гашения на основе алгоритма с процедурой поблочной адаптации в частотной области. Предложенный способ отличается высокой скоростью сходимости, а также возможностью реализации вычислительной части системы на ЭВМ общего назначения. Представлены результаты имитационного моделирования и экспериментального исследования эффективности предложенной системы активного гашения на созданном макете. Показано, что, используя описанный в работе способ построения системы активного гашения, удалось достичь уровня подавления до 20 дБ на экспериментальном макете и до 28 дБ на имитационной модели. Отдельное внимание уделено архитектуре экспериментального макета и используемым программным средствам.

*Ключевые слова:* система активного гашения звука, адаптивное шумоподавление

**DOI:** 10.31857/S0320791925010149, **EDN:** BPQHLL

## ВВЕДЕНИЕ

Рост темпов и масштабов промышленного производства при одновременном увеличении точности и сложности отдельных технологических процессов ставит более высокие требования к шумоизоляции промышленного оборудования [1–2], производственных и жилых помещений [3–4]. Шумоизоляция является важным фактором для улучшения условий труда [5], а также обеспечения комфорта пассажиров воздушных и водных судов [6].

Достаточно эффективными и простыми способами решения задачи шумоизоляции являются пассивные методы. Такие методы применяются в промышленности для снижения шума, создаваемого машинами, механизмами, транспортными средствами и т.д. Как правило, методы пассивной шумоизоляции заключаются в использовании шумопоглощающих материалов [7], в том числе метаматериалов [8] различного состава и формы. Главным недостатком такого подхода является недостаточная эффективность в области низких частот [9]. Более эффективны при борьбе с низкочастотным шумом системы, использующие методы активного шумоподавления [9].

Возможность использования методов активного подавления акустического излучения, создаваемого источниками, расположенными внутри замкнутой области пространства, была теоретически обоснована в [10]. В основе данного подхода лежит формирование охватывающих данную область пространства поверхностей из компенсирующих излучающих элементов и приемников остаточного поля. При этом целью работы системы активного гашения является формирование компенсирующими излучающими элементами поля, минимизирующего суммарную мощность на поверхности, образованной из приемников остаточного поля. Если полное поле на поверхности, окружающей источник, стремится к нулю, то и мощность, излучаемая системой в дальней зоне, стремится к нулю [11].

В дальнейшем многими авторами были предложены методы реализации систем активного гашения [12, 13]. Обширные исследования систем активного гашения проводились на радиофизическом факультете Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского в 1980–1990-е гг. Подробный обзор проведенных теоретических и экспериментальных работ представлен в

работе [14]. Исследования выполнялись в рамках НИР для предприятий и отраслевых НИИ в тесном сотрудничестве с Институтом прикладной физики Академии наук. Координацию и продвижение данных работ осуществлял член-корр. РАН В.А. Зверев. Он всегда с большим интересом относился к исследованиям по активному гашению в акустике, высоко оценивая их фундаментальную и прикладную значимость.

Отдельно рассматриваются узкополосные системы активного гашения. Адаптивные алгоритмы компенсации узкополосных акустических полей были предложены и экспериментально исследованы еще в 1980-е гг. [15, 16]. Особенности реализации и предельные возможности данных систем представлены в [11, 20]. В таких системах компенсирующее воздействие в виде гармонического сигнала формируется управляемым генератором с учетом амплитудно-фазового распределения компенсируемого поля на приемных элементах системы. Компенсация широкополосных акустических полей с использованием предложенного подхода невозможна.

На практике более актуальным является гашение именно широкополосных полей. Системы активного гашения широкополосного акустического излучения принципиально отличаются по архитектуре. Первыми работами, посвященными активному гашению широкополосных акустических полей, были [17–19]. В основе работы данных систем лежит преобразование сигналов, получаемых от опорных датчиков, при помощи специальных формирующих фильтров с конечными импульсными характеристиками (ИХ) [12]. Опорные датчики, которые обычно представляют собой акустические приемники или вибродатчики, располагаются вблизи источников компенсируемого излучения. При этом с помощью адаптивного итерационного алгоритма производится минимизация суммарной мощности излучения в местах расположения приемных элементов путем подстройки коэффициентов формирующих фильтров.

По способу реализации, данные системы можно разделить на два класса: реализация во временной и частотной области.

Вариант реализации во временной области имеет высокую вычислительную сложность, что значительно повышает требования к используемым вычислительным средствам, и довольно медленную сходимость.

Одним из способов снижения вычислительной сложности является использование покадровой обработки данных, например, в частотной области [21]. При этом неизбежно возникает задержка обработки сигналов, влияющая на допустимую ширину полосы компенсируемого сигнала. Известны способы борьбы с возникающей при такой

обработке задержкой [22], заключающиеся в формировании компенсирующего воздействия во временной области при расчете параметров формирующих фильтров в частотной области.

В данной работе описана активная система гашения, которая аналогично системе, представленной в [22], осуществляет процесс формирования компенсирующего воздействия во временной области и адаптацию системы в частотной. В отличие от [22] адаптация системы производится с использованием метода наименьших квадратов, что позволяет увеличить скорость и точность сходимости используемого алгоритма. Показаны результаты имитационного моделирования и экспериментальных исследований, проведенных с использованием изготовленного макета. Отдельное внимание уделено описанию аппаратных средств, необходимых для практической реализации системы активного гашения: рассмотрена архитектура экспериментального макета, подробно описаны элементы системы, в том числе многофункциональное устройство сбора и генерации сигналов, а также программные средства для реализации макета.

### СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ И АЛГОРИТМ АКТИВНОГО ГАШЕНИЯ

На рис. 1 представлена структурная схема системы активного гашения акустического излучения. На схеме показаны: источник компенсируемого акустического излучения “ИСТ” с расположенными рядом с ним  $I$  опорными датчиками, набор  $J$  управляемых излучателей и  $K$  приемников остаточного поля. Штрихпунктирной линией показан формирующий многоканальный фильтр, с выходов которого сигналы подаются на управляемые излучатели. Пунктирными линиями показаны пути распространения акустических сигналов от источника компенсируемого излучения и от управляемых излучателей до приемников остаточного поля. Управление формирующим многоканальным

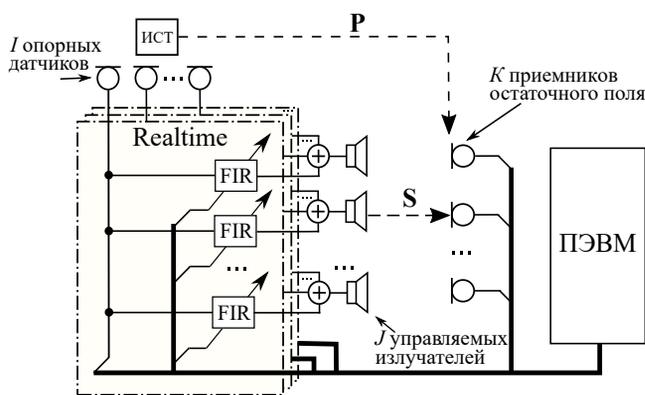


Рис. 1. Структурная схема системы активного гашения.

фильтром производится с ПЭВМ в соответствии с предложенным алгоритмом.

Рассмотрим работу алгоритма в частотной области. Введем следующие обозначения<sup>1</sup>:  $\mathbf{y}_p = \mathbf{P}\mathbf{v}$  — поле, создаваемое источниками компенсируемого излучения, регистрируемое приемниками остаточного поля в точках их расположения<sup>2</sup>,  $\mathbf{y}_s = \mathbf{S}\mathbf{y}$  — поле, создаваемое управляемыми излучателями и регистрируемое приемниками в точках их расположения<sup>3</sup>, где  $\mathbf{v}$  — сигнал, регистрируемый опорными датчиками,  $\mathbf{P}$  — передаточная матрица от источников компенсируемого излучения до приемников,  $\mathbf{S}$  — передаточная матрица от управляемых излучателей до приемников на выбранной частоте. Обозначим  $\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{v}$  — сигналы, подаваемые на управляемые излучатели<sup>4</sup>, где  $\mathbf{W}$  — матрица, составленная из амплитудно-фазовых частотных характеристик (АФЧХ) формирующих фильтров. В таком случае остаточное поле, регистрируемое приемными элементами будет выглядеть следующим образом:

$$\mathbf{e} = \mathbf{y}_p + \mathbf{y}_s = \mathbf{P}\mathbf{v} + \mathbf{S}\mathbf{y} = \mathbf{P}\mathbf{v} + \mathbf{S}\mathbf{W}\mathbf{v}. \quad (1)$$

Запишем средний квадрат уровня остаточного поля на приемных элементах:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}^H \mathbf{e} &= (\mathbf{y}_p + \mathbf{S}\mathbf{W}\mathbf{v})^H (\mathbf{y}_p + \mathbf{S}\mathbf{W}\mathbf{v}) = \\ &= \mathbf{y}_p^H \mathbf{y}_p + \mathbf{y}_p^H \mathbf{S}\mathbf{W}\mathbf{v} + \mathbf{v}^H \mathbf{W}^H \mathbf{S}^H \mathbf{y}_p + \mathbf{v}^H \mathbf{W}^H \mathbf{S}^H \mathbf{S}\mathbf{W}\mathbf{v}. \end{aligned}$$

К этой величине добавим ограничение на значения вычисляемых АФЧХ формирующих фильтров  $\text{ctr}(\mathbf{W}\mathbf{W}^H)$ , тогда целевая функция запишется как

$$\begin{aligned} F &= \mathbf{e}^H \mathbf{e} + \alpha \text{ctr}(\mathbf{W}\mathbf{W}^H) = \mathbf{y}_p^H \mathbf{y}_p + \mathbf{y}_p^H \mathbf{S}\mathbf{W}\mathbf{v} + \\ &+ \mathbf{v}^H \mathbf{W}^H \mathbf{S}^H \mathbf{y}_p + \mathbf{v}^H \mathbf{W}^H \mathbf{S}^H \mathbf{S}\mathbf{W}\mathbf{v} + \alpha \text{ctr}(\mathbf{W}\mathbf{W}^H), \end{aligned}$$

где  $\alpha$  — коэффициент регуляризации. Определим минимум  $F$ , приравняв его производную к нулю:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \mathbf{W}} &= \mathbf{S}^H \mathbf{y}_p \mathbf{v}^H + \mathbf{S}^H \mathbf{y}_p \mathbf{v}^H + \mathbf{S}^H \mathbf{S}\mathbf{W}(\mathbf{v}^H + \mathbf{v}^H) + \alpha \mathbf{W} = \\ &= 2\mathbf{S}^H \mathbf{y}_p \mathbf{v}^H + 2\mathbf{S}^H \mathbf{S}\mathbf{W}\mathbf{v}^H + \alpha \mathbf{W} = 0. \end{aligned}$$

В результате получим следующее уравнение:

$$2\mathbf{S}^H \mathbf{y}_p \mathbf{v}^H + 2\mathbf{S}^H \mathbf{S}\mathbf{W}\mathbf{v}^H + \alpha \mathbf{W} = 0. \quad (2)$$

Введем обозначения

$$\mathbf{A} = 2\mathbf{S}^H \mathbf{S}, \quad \mathbf{B} = \mathbf{v}\mathbf{v}^H, \quad \mathbf{C} = -2\mathbf{S}^H \mathbf{y}_p \mathbf{v}^H.$$

Тогда (2) запишется в виде:

$$\mathbf{A}\mathbf{W}\mathbf{B} + \alpha \mathbf{W} = \mathbf{C}.$$

Решением его является [23]:

$$\text{vec}(\mathbf{W}) = (\alpha \mathbf{I} + \mathbf{B}^T \otimes \mathbf{A})^{-1} \text{vec}(\mathbf{C}),$$

где

$$\mathbf{A} \otimes \mathbf{B} = \begin{bmatrix} A_{11}\mathbf{B} & A_{12}\mathbf{B} & \dots & A_{1n}\mathbf{B} \\ A_{21}\mathbf{B} & A_{22}\mathbf{B} & \dots & A_{2n}\mathbf{B} \\ \vdots & & & \vdots \\ A_{m1}\mathbf{B} & A_{m2}\mathbf{B} & \dots & A_{mn}\mathbf{B} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad \text{vec}(\mathbf{A}) = \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{21} \\ A_{12} \\ A_{22} \end{bmatrix},$$

$\mathbf{I}$  — единичная матрица.

По полученным АФЧХ формирующих фильтров  $\mathbf{W}$  можно определить ИХ через обратное преобразование Фурье ( $\mathbf{H} = \mathcal{F}^{-1}(\mathbf{W})$ ). В связи с тем, что  $\mathbf{W}$  при неизменяемых параметрах системы ( $\mathbf{S}$  и  $\mathbf{P}$ ) остается постоянной (см. рис. 3, формулу (3) из [13]), можно реализовать систему, которая обеспечивает вычисление  $\mathbf{W}$  по записанным сигналам и формирует напряжения, подаваемые на управляемые излучатели по отсчетам сигналов с опорных датчиков и вычисленным  $\mathbf{W}$ . Данный способ достаточно просто реализуется путем использования ПЭВМ и устройства обработки сигналов, подключенного к многоканальным АЦП и ЦАП. При этом устройство обработки сигналов в реальном времени используется только для вычисления свертки опорных сигналов с ИХ формирующих фильтров, что значительно снижает предъявляемые к нему требования.

Следует заметить, что для функционирования системы необходимо наличие оценок ИХ путей распространения акустических волн каждой из пар “управляемый излучатель—приемник остаточного поля”. Оценка АФЧХ  $\mathbf{S}$  осуществляется отдельной процедурой калибровки перед началом работы.

В некоторых случаях полученные таким способом ИХ формирующих фильтров имеют некаузальную составляющую, т.е. решение оказывается физически нереализуемым. Для борьбы с этим эффектом был использован метод, заключающийся в обнулении некаузальной части импульсных характеристик  $\mathbf{H}$  и итерационном обновлении решения по отсчетам остаточного поля [24]. При этом на следующей итерации вместо отсчетов компенсируемого сигнала  $\mathbf{y}_p$  используются отсчеты остаточного поля:

$$\mathbf{y}_p \leftarrow \mathbf{y}_p + \mathbf{S}\mathbf{W}\mathbf{v},$$

а вычисленное решение суммируется с решением, полученным на предыдущей итерации

$$\mathbf{H} \leftarrow \mathbf{H} + \mathcal{F}^{-1}(\mathbf{W}).$$

<sup>1</sup> В сносках указаны размерности соответствующих матриц; индексы, соответствующие частоте, опущены.

<sup>2</sup>  $\mathbf{y}_p = [K \times 1]$ ,  $\mathbf{P} = [K \times I]$ ,  $\mathbf{v} = [I \times 1]$ .

<sup>3</sup>  $\mathbf{y}_s = [K \times 1]$ ,  $\mathbf{S} = [K \times J]$ ,  $\mathbf{y} = [J \times 1]$ .

<sup>4</sup>  $\mathbf{y} = [J \times 1]$ ,  $\mathbf{W} = [J \times I]$ .

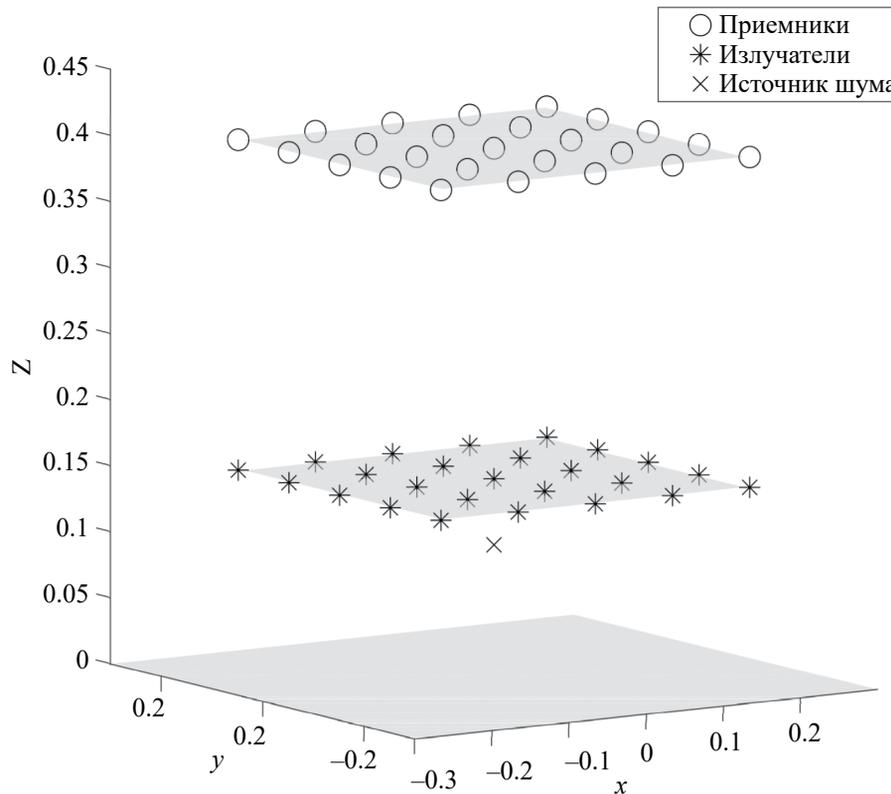


Рис. 2. Взаимное расположение элементов системы активного гашения.

Данный способ позволяет достичь более глубокого уровня подавления.

### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Проверка предложенного способа реализации системы активного гашения была проведена на имитационной модели. Использовалась плоская квадратная решетка из 25 излучателей с расположенной над ней плоской решеткой из 25 приемных элементов. Взаимное расположение элементов фрагмента системы гашения показано на рис. 2. Источником компенсируемого излучения являлся точечный излучатель, расположенный вблизи стенки, отражающей акустические волны. Источник излучал полосовой шум с полосой частот 500–1000 Гц. Вычисление  $W$  и  $H$  производилось поочередно и корректировалось по остаточному полю, регистрируемому во время записи очередного блока.

Уровни подавления, достигаемого в плоскости расположения приемников остаточного поля, приведены на рис. 3. Уровень подавления оценивался по формуле  $10\lg\left(\frac{P_0}{P}\right)$ , где  $P_0$  — мощность сигнала на выходе приемника остаточного поля до включения системы,  $P$  — мощность сигнала на выходе приемника остаточного поля после включения системы.

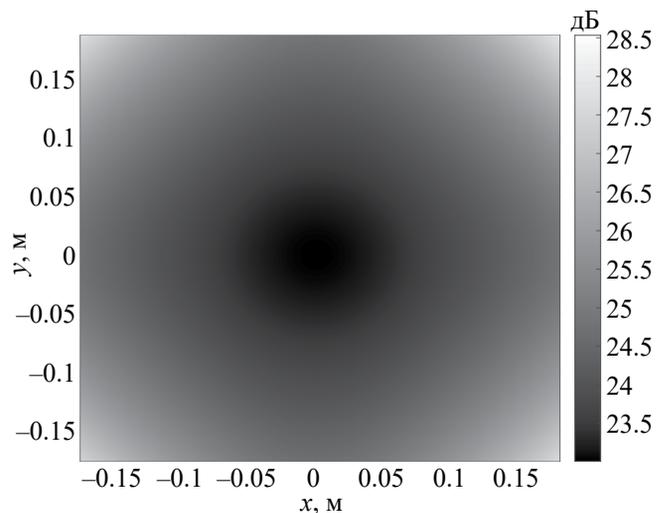


Рис. 3. Уровни подавления на контрольных приемниках имитационной модели.

Из рис. 3 видно, что уровень подавления акустического излучения в некоторых областях достигает 28 дБ. Эффективность подавления акустического излучения, достигаемая подобной системой в дальней зоне, подробно рассмотрена в [25].

На рис. 4 для сравнения показаны результаты моделирования работы системы активного

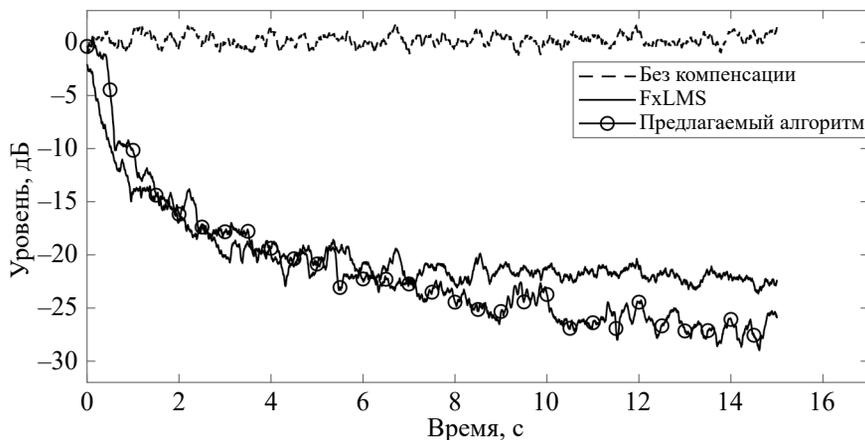


Рис. 4. Сравнение скорости сходимости и уровня подавления для алгоритма FxLMS и алгоритма поблочной адаптации в частотной области.

гашения для двух алгоритмов: предлагаемого в данной статье и широко известного алгоритма FxLMS. Моделирование проводилось для следующих параметров:

- частота дискретизации 10 кГц;
- длина ИХ каждого пути  $P$  и  $S$  — 40 отсчетов;
- количество коэффициентов каждого адаптивного фильтра — 120;
- отношение  $C/Ш$  — 30 дБ;
- размер блока при адаптации в частотной области — 5000 дискретных отсчетов;
- количество приемников — 25;
- количество управляемых излучателей — 25;
- количество опорных датчиков — 1.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 5 приведена фотография изготовленного экспериментального стенда: внизу расположен источник акустического излучения, далее управляемые излучатели (динамические головки), над ними микрофоны, регистрирующие остаточное поле. Расстояние между излучающими и приемными элементами регулировалось, что позволяло реализовать различные варианты геометрии системы. Стоит отметить, что наибольшая эффективность подавления достигается при описанной выше геометрии системы, она же представлена на фото на рис. 5.

Регистрация опорного сигнала, остаточного поля, а также генерация компенсирующего воздействия осуществлялась при помощи многофункционального блока ввода и формирования сигналов (БВФС), построенного на базе ПЛИС Cyclone V 5CEFA9F23C8, выпускаемой компанией Intel (ранее Altera).

БВФС имел 128 дифференциальных входных каналов для ввода аналоговых сигналов,

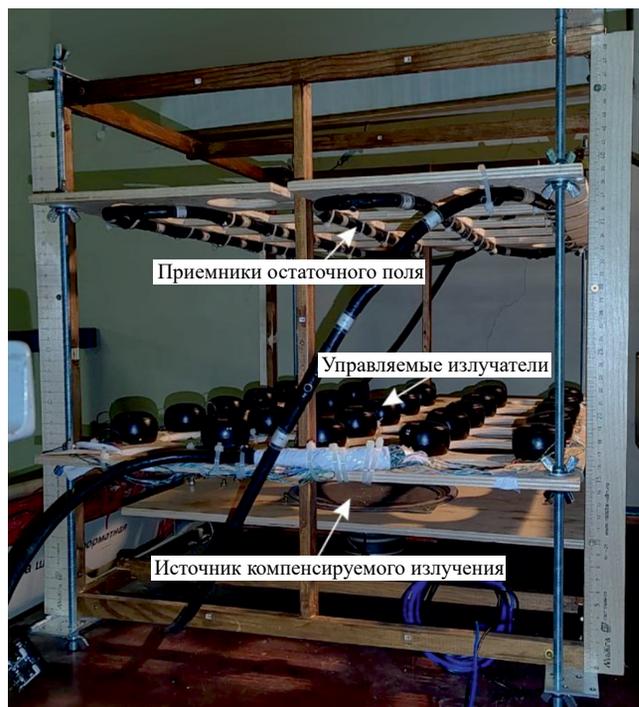


Рис. 5. Макет системы активного шумоподавления.

оцифровываемых с помощью микросхем АЦП АК5534, и 128 выходных каналов, организованных с помощью микросхем ЦАП АК4438 производства фирмы AsahiKASEI.

Управление работой БВФС и взаимодействие с управляющей ЭВМ по интерфейсу Ethernet обеспечивалось при помощи сигнального процессора BlackFin ADSP-BF537 производства фирмы Analog Devices.

Согласование выходов БВФС с низкоомными управляемыми излучателями производилось при помощи многоканального усилителя мощности

класса D на базе микросхем ТРА3251 фирмы Texas Instruments.

Вычисление свертки опорного сигнала с ИХ многоканального формирующего фильтра производилось в ПЛИС, вычисление ИХ по отсчетам опорного сигнала и остаточного поля, а также управление работой алгоритма и отображение его состояния — в ПЭВМ общего назначения. Управляющее программное обеспечение было разработано при помощи языка программирования Julia, сочетающего высокую скорость работы за счет использования JIT-компиляции и простоту разработки с применением обширного набора библиотек.

Параметры адаптивной системы:

частота дискретизации — 6 кГц;

количество коэффициентов адаптивных КИХ-фильтров — 256;

размер блока при адаптации в частотной области — 2048;

количество приемников — 25;

количество управляемых излучателей — 25;

количество опорных датчиков — 1.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА

Ниже приведены результаты исследования. На рис. 6 сравнивается спектральная плотность мощности исходного и остаточного сигналов на одном из приемников остаточного поля. Разница составляет порядка 20 дБ. Распределение уровней подавления в плоскости расположения приемников остаточного поля представлено на рис. 7. Стоит отметить, что уровень акустического поля распределен по решетке приемников остаточного поля неравномерно. Описанный эффект может быть связан с физическими особенностями проведения эксперимента.

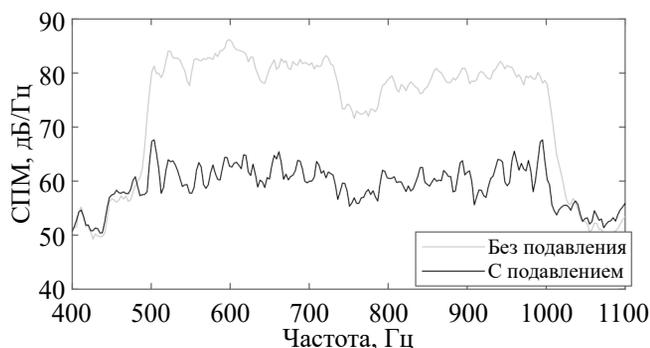


Рис. 6. Спектральная плотность мощности исходного и остаточного сигналов.

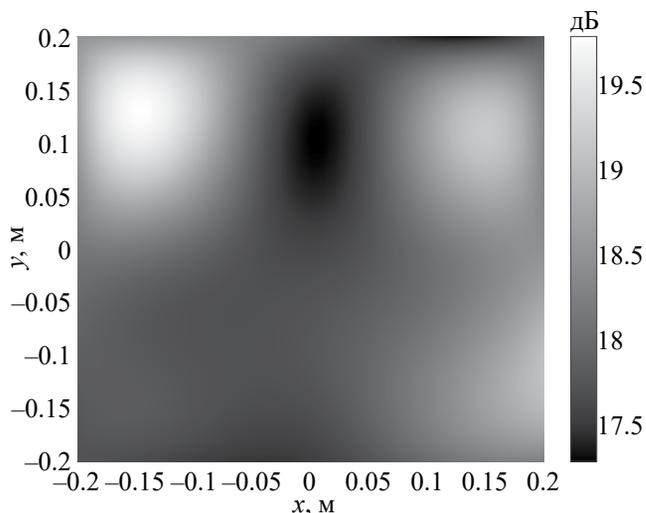


Рис. 7. Уровень подавления на контрольных приемниках.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассматривается задача построения системы активного гашения с процедурой поблочной адаптации с применением минимизации мощности остаточного шумоизлучения в частотной области. Данный способ позволяет существенно упростить практическую реализацию системы в сравнении с известными адаптивными алгоритмами. С использованием предложенного алгоритма разработана имитационная модель и экспериментальный стенд. Проверка эффективности работы системы показала, что уровень подавления широкополосного акустического излучения достигает 28 дБ на имитационной модели и 20 дБ на экспериментальном стенде.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН по теме FFUF-2024-0040.

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам ИПФ РАН О.А. Потапову, А.М. Сокову, А.С. Марушину и О.О. Егошину за участие в изготовлении экспериментального макета.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А.В. Опыт исследования и снижения низкочастотного шума энергетических установок // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Под ред. Иванова Н.И. СПб.: Институт акустических конструкций, 2021. С. 30–39.
2. Hirose S., Kajikawa Y. Effectiveness of Headrest ANC System with Virtual Sensing Technique for Factory Noise // Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), Kuala Lumpur, Malaysia, 2017. P. 464–468. <https://doi.org/10.1109/APSIPA.2017.8282076>

3. *Васильев А.В.* Перспективы использования активной компенсации для снижения низкочастотного шума и вибрации в условиях производства // *Безопасность труда в промышленности*. 2004. № 10. С. 47–51.
4. *Wen S., Nguyen D.H., Wang M. and Gan W.S.* Design and Evaluation of Active Noise Control on Machinery Noise // *Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (AP-SIPA ASC)*, Tokyo, Japan, 2021. P. 1180–1186.
5. *Sharma M.K., Vig R.* Server Noise: Health Hazard and its Reduction Using Active Noise Control // *Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS)*, Chandigarh, India, 2014. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/RAECS.2014.6799628>
6. *Cheng-Yuan Chang, Chia-Tseng Chuang, Sen M. Kuo, Chia-Hao Lin.* Multi-functional active noise control system on headrest of airplane seat // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022. V. 167. P. A. 108552. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108552>
7. *Казиков Л.И.* Резонансный звукопоглотитель воздушного шума // *Акуст. журн.* 2021. Т. 67. № 5. С. 475–481.
8. *Бобровницкий Ю.И., Томилина Т.М.* Поглощение звука и метаматериалы (обзор) // *Акуст. журн.* 2018. Т. 64. № 5. С. 517–525.
9. *Denenberg J.N.* Anti-noise // *IEEE Potentials*, April 1992. V. 11. № 2. P. 36–40. <https://doi.org/10.1109/45.127730>
10. *Малюжинец Г.Д.* Нестационарные задачи дифракции для волнового уравнения с финитной правой частью // *Тр. Акустического института*. 1971. № 15. С. 124–139.
11. *Фикс И.Ш., Коротин П.И., Помапов О.А., Фикс Г.Е.* Экспериментальные исследования компенсации звукового поля на дискретных частотах // *Акуст. журн.* 2016. Т. 62. № 2. С. 208–215. <https://doi.org/10.7868/S0320791916020052>
12. *Elliott S.J.* *Signal Processing for Active Control*. London, UK, Academic Press, 2001. P 511. <https://doi.org/10.1016/B978-012237085-4/50012-0>
13. *Kuo S.M., Morgan D.R.* Active noise control: a tutorial review // *Proc. IEEE*. 1999. V. 87. № 6. P. 943–975. <https://doi.org/10.1109/5.763310>
14. *Мальцев А.А., Масленников Р.О., Хоряев А.В., Черепенников В.В.* Адаптивные системы активного гашения шума и вибраций // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. № 2. С. 242–258.
15. *Королев И.А., Лепендин В.П., Мальцев А.А., Черепенников В.В.* Исследование адаптивной системы активного гашения узкополосного акустического поля в прямоугольном бассейне // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1987. Т. 30. № 1. С. 70–77.
16. *Королев И.А., Мальцев А.А., Черепенников В.В.* Исследование адаптивной системы активного гашения двухмодового акустического поля в замкнутом воздушном объеме // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1988. Т. 31. № 9. С. 1141–1143.
17. *Арзамасов С.Н., Мальцев А.А.* Адаптивный алгоритм активной компенсации широкополосного случайного поля // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1985. Т. 28. № 8. С. 1008
18. *Ross C.E* An algorithm for designing a broadband active sound control system // *J. Sound Vibration*. 1982. V. 80. P. 373–380.
19. *Elliott S.J. and Nelson EA.* Algorithm for multichannel LMS adaptive filtering // *Electronics Letters*. 1985. V. 21. P. 979–981.
20. *Фикс И.Ш., Фикс Г.Е.* Предельные возможности активного гашения звуковых гармонических сигналов // *Изв. РАН. Сер. физич.* 2018. Т. 82. № 5. 601–606. <https://doi.org/10.7868/S0367676518050162>
21. *Tang X.L., Lee C.M.* Time–frequency-domain filtered-x LMS algorithm for active noise control // *J. Sound Vibration*. 2012. V. 331. № 23. P. 5002–5011. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.07.009>
22. *Kuo S.M., Yenduri R.K., Gupta A.* Frequency-domain delayless active sound quality control algorithm // *J. Sound Vibration*. 2008. V. 318. № 4–5. P. 715–724. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.04.029>
23. *Petersen K.B., Pedersen M.S.* *The Matrix Cookbook*. Version: November 15, 2012. <https://math.uwaterloo.ca/~hwolkowi/matrixcookbook.pdf>
24. *Karaseva V.A., Lvov A.V., Rodionov A.A.* Frequency-Domain Wideband Acoustic Noise Cancellation System // *J. Applied Mathematics and Physics*. 2023. V. 11. № 8. P. 2523–2532. <https://doi.org/10.4236/jamp.2023.118163>
25. *Львов А.В., Карасева В.А., Помапов О.А., Соков А.М.* Адаптивная система активного гашения акустического широкополосного излучения с динамической калибровкой // *Акуст. журн.* 2023. Т. 69. № 3. С. 357–366. <https://doi.org/10.31857/S0320791922100148>

## **Experimental Study of a Broadband Active Noise Control Algorithm with Fast Adaptation in the Frequency Domain**

**A. V. Lvov<sup>a,\*</sup>, V.A. Karaseva<sup>a</sup>, A.A. Rodionov<sup>a</sup>, A.G. Okunev<sup>a</sup>**

*Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), Ulyanova 46, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

*\*e-mail: lvov@ipfran.ru*

The paper proposes a method for constructing an active cancellation system based on an algorithm with a block adaptation procedure in the frequency domain. The proposed method has a high convergence rate and can be implemented on a general-purpose computer. The results of the simulation modeling and experimental study of the effectiveness of the proposed active cancellation system on the created setup are presented. It is shown that using the method described in the paper for constructing an active noise control system, a suppression level up to 20 dB can be achieved on the experimental setup and up to 28 dB in the simulation model. Special attention is paid to the architecture of the experimental setup and the software used.

*Keywords:* active noise cancellation system, adaptive noise cancellation