

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКИХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ПОМЕЩЕНИЙ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

С.Г. Семенцов¹

siemens_off@mail.ru

Л.Р. Байкина²

linka9389@mail.ru

Т.В. Половинкина³

po_tatka@mail.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация² Компания IntegrIT, Мытищи, Московская обл., Российская Федерация³ АО «Корпорация «ВНИИЭМ», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены методы моделирования акустических передаточных функций систем активного гашения шума. На примере помещений с произвольной геометрией предложен новый подход к моделированию на основании априорной информации об объекте управления. Показана высокая эффективность трассерных методов при моделировании передаточных функций в помещениях произвольной формы. Проведена оценка адекватности рассмотренных моделей при различных входных воздействиях

Ключевые слова

Акустическая передаточная функция, трассерный анализ, идентификация

Поступила в редакцию 17.03.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Введение. Широкому распространению методов активного гашения акустических полей способствовали, во-первых, необходимость снижения шума в низкочастотном диапазоне, где классические пассивные средства малоэффективны, во-вторых, успехи в области теории систем управления, вычислительной техники, цифровой обработки сигналов, микроэлектроники и миниатюризации электроакустических преобразователей.

Долгое время средства акустической защиты применяли в промышленных системах снижения шума, в волноводах и индивидуальных системах промышленного и специального назначения, например, в системах защиты персонала палубной авиации и пилотов. В последние годы в связи со значительным снижением стоимости этих систем их стали использовать и в бытовой сфере.

При их практической реализации возникают дополнительные трудности. В частности, до 1990-х годов не были разработаны методы моделирования акустических полей в замкнутых объемах (т. е. в помещениях с произвольной геометрией и заданными граничными условиями, рис. 1) [1, 2]. Не были также достаточно развиты численные методы, например методы конечных и граничных элементов, а уровень развития средств цифровой сигнальной обработки не позволял с достаточной степенью адекватности реализовать системы с моделью объекта управления, работающие в реальном времени. В последние годы прогресс в перечисленных областях дал возможность на новом качественном

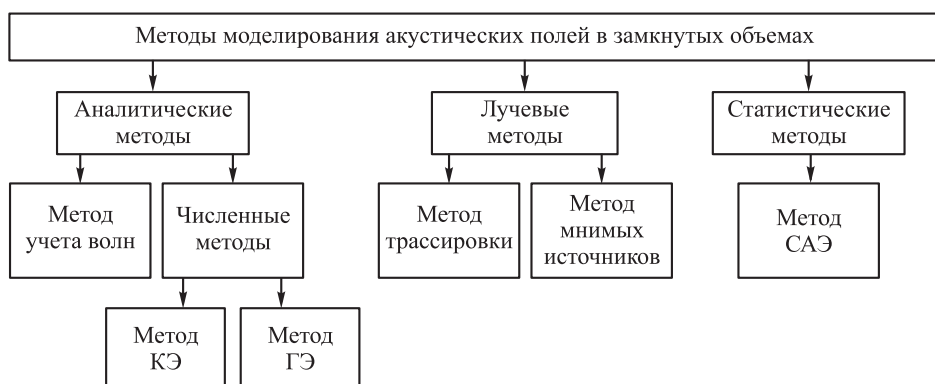


Рис. 1. Классификация методов моделирования акустических полей в замкнутых объемах (САЭ — статистический анализ энергии; КЭ — конечный элемент; ГЭ — граничный элемент)

уровне подойти к решению этой проблемы. Так, современные средства цифровой сигнальной обработки позволяют моделировать импульсный отклик помещения длительностью 300...600 мс, что вполне достаточно для небольших и средних помещений.

Точное аналитическое решение передаточной функции среды распространения в замкнутых объемах может быть найдено лишь для тривиальных случаев [2]. В связи с этим для решения могут быть использованы численные и эмпирические методы. Метод суммирования мод позволяет с высокой точностью моделировать частотный отклик помещения в модальной зоне вплоть до частоты Шредера (граничная частота, выше которой модальная модель не применима) [3]. Необходимую точность моделирования указанный метод обеспечивает лишь для помещений простой формы с однозначно определяемыми модальными частотами.

Для помещений произвольной формы было разработано поколение так называемых трассерных методов моделирования передаточных функций, являющихся гибридом лучевых методов и методов мнимых источников [4]. В качестве примера конкретной реализации этих методов можно привести программные пакеты Odeon (фирмы Bruel&Kjaer [4]) и CARA (Computer Aided Room Acoustics, фирмы ELAC [5]).

Исходные данные для моделирования — трехмерная модель помещения с указанием материалов покрытий, координат крупных предметов и расположением приемников (или излучателей) (рис. 2).

В ряде работ [2–6] рассмотрены успешные примеры моделирования акустических параметров помещений и концертных залов, поэтому можно сделать вывод о применимости трассерных методов для моделирования передаточных функций помещений произвольной формы.

Анализ активных систем снижения шума с позиции теории управления.

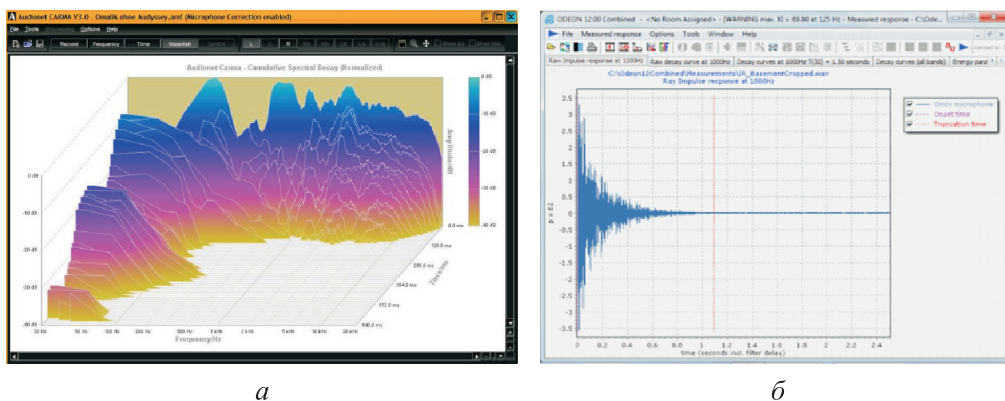
В зависимости от способа реализации все системы активного гашения (САГ) шума можно подразделить на два класса: 1) разомкнутые; 2) замкнутые [7].



Рис. 2. Трехмерная трассерная модель помещения сложной формы

В замкнутых САГ (адаптивных САГ, АСАГ) настройка параметров осуществляется в замкнутом контуре. При этом возможны два варианта реализации: 1) замкнутые АСАГ без модели объекта управления (МОУ); 2) замкнутые АСАГ с МОУ.

Для выбранного входного случайного воздействия $x(n)$, пары источник–приемник, температуры, влажности и давления рассчитывают выходной сигнал $y(n)$ (рис. 3).



a

б

Рис. 3. Акустический отклик помещения, трехмерная трассерная модель которого представлена на рис. 2, смоделированный в частотной (*a*) и во временной (*б*) областях

Особенность первого варианта реализации АСАГ — применение методов идентификации не для определения структуры и параметров модели процесса гашения, а для оценки критерия качества гашения на основе поступающих из основного контура сигналов. Эти сигналы задают как некоторый одноэкстремальный функционал качества управления. В таких АСАГ накопление текущей информации об изменяющихся характеристиках объекта управления и возму-

щающих воздействиях, а также соответствующая настройка параметров блока управления в целях постоянного обеспечения максимальной эффективности компенсации происходят автоматически в ходе функционирования системы. Указанные АСАГ можно использовать при нестационарном характере среды и стационарном характере гасимых полей, что обусловлено необходимостью обучения этих систем.

Особенность второго варианта реализации АСАГ — наличие соединенной в параллель с основной системой МОУ, которая аппроксимирует передаточную функцию среды для заданного расположения источника и приемника. Настройку регулятора основной системы также осуществляют в процессе адаптивного регулирования в зависимости от сигнала ошибки компенсации. Основным недостатком АСАГ с МОУ — сложность формирования адекватной модели. Предполагают, что для АСАГ без МОУ выполняются условия квазистационарности процесса гашения. Для АСАГ с МОУ требования к стационарности процесса гашения не столь жесткие, однако при их реализации необходимо проведение мероприятий по обеспечению устойчивости системы.

Рассмотрим особенности практической реализации АСАГ без МОУ и с МОУ. В АСАГ без МОУ (рис. 4, а) на входное воздействие (шум) $x(k)$ блок управления вырабатывает отклик (выход адаптивного фильтра) $y(k)$, а объект управления — отклик $d(k)$. Разностный сигнал (сигнал ошибки гашения) $e(k)$ поступает в блок управления, где по критерию минимизации ошибки с помощью адаптивного алгоритма пересчитываются коэффициенты цифрового фильтра, т. е. формируется новый отклик $y'(k)$. Таким образом, в процессе настройки система моделирует поведение объекта управления для заданного входного воздействия. В этом случае под объектом управления понимают акустическое поле внутри защищаемых объектов (комната, чашка наушника, волновод). Кроме передаточной функции среды распространения, на параметры моделируемого акустического поля влияют передаточные функции используемых датчиков и излучателей, временные задержки обработки сигнала, изменение температуры и влажности среды и т. д. Блок управления в процессе настройки должен кроме возможного изменения входного сигнала отрабатывать и изменения характеристик объекта управления. Следует учесть, что для пространственных систем длительность импульсной характеристики объекта управления превышает 1000 мс. Для аппроксимации импульсной характеристики такой длины необходим адаптивный цифровой фильтр высокого порядка. Однако согласно экспериментам и результатам моделирования, применение фильтров высоких порядков снижает эффективность гашения и скорость сходимости адаптивного алгоритма [8].

Формируемый системой отклик должен учитывать импульсные характеристики элементов электроакустического тракта (усилителей, микрофонов, излучателей), аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, что также приводит к необходимости использования фильтров высоких порядков.

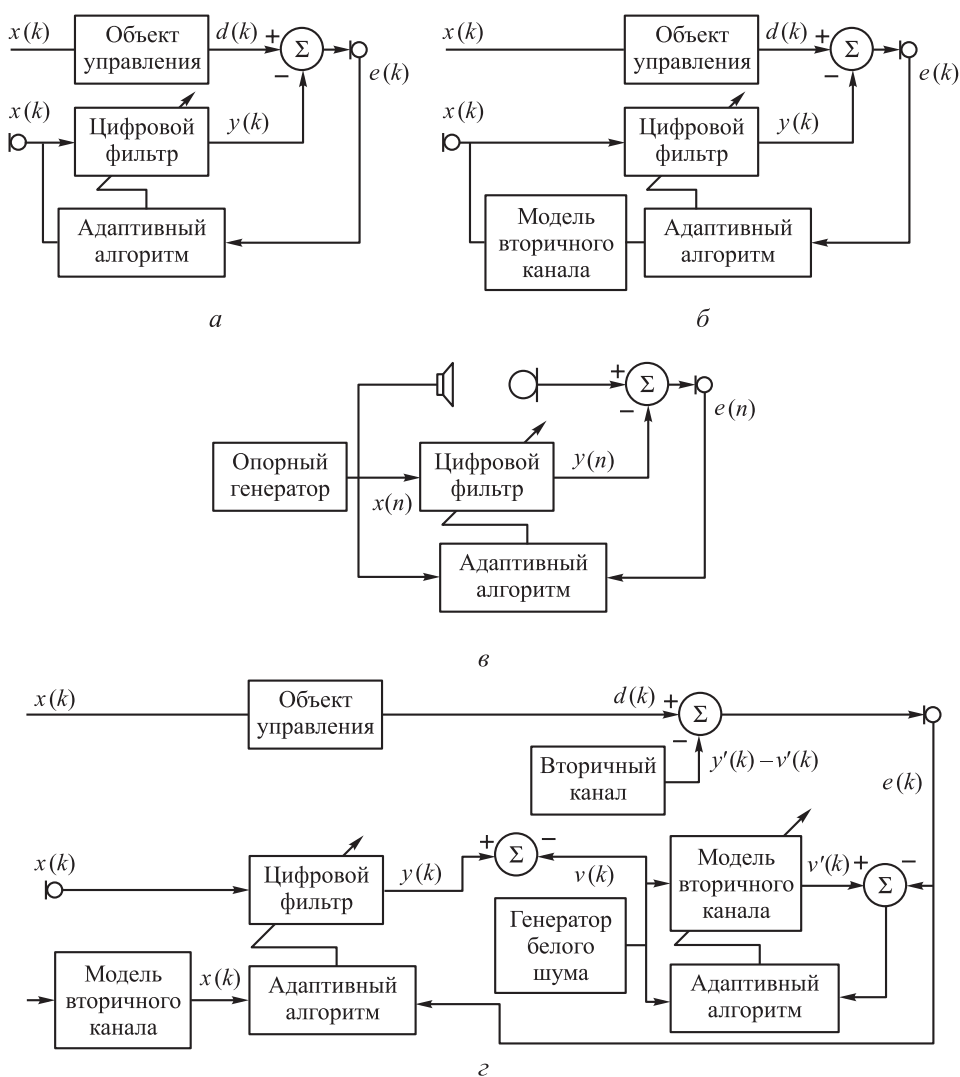


Рис. 4. Типовые управляющие схемы АСАГ без МОУ (а), с использованием модели акустической передаточной функции (б), полученные методом офлайн-моделирования (в) и онлайн-моделирования (г):

$x(n)$ — входное воздействие (шум); $y(n)$ — выход адаптивного фильтра; $e(n)$ — сигнал ошибки гашения; $v(k)$ — идентифицирующий сигнал; $v'(k)$ — отклик синтезированной модели объекта управления

Частично эту проблему решают за счет применения модификаций адаптивных алгоритмов с помощью моделей передаточной функции (Secondary Path Transfer Function). Чаще всего в АСАГ применяют так называемый FX-LMS (filtered-X LMS) алгоритм (рис. 4, б) [9].

В указанном алгоритме модель вторичного канала представляет собой интегральную передаточную характеристику объекта управления, цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователей, усилителей и излучателей. Модель вторичного канала может быть получена в процессе идентификации

системы методами онлайн- и офлайн-моделирования. При офлайн-моделировании (рис. 4, в) моделирование происходит в процессе настройки адаптивного фильтра при случайном входном сигнале.

Недостаток такой АСАГ — необходимость проведения экспериментов для идентификации системы, требуемой для данного помещения, и определения расположения пары источник–приемник. Система, полученная методом онлайн-моделирования (рис. 4, з), лишена этого недостатка, поскольку при наличии в системе второго контура настройки идентификация происходит во время работы системы [10]. Однако алгоритм работы системы значительно усложняется, что приводит к трудностям при моделировании и практической реализации системы. Тем не менее использование таких алгоритмов повышает качественные показатели системы, прежде всего, за счет снижения требований к адаптивному фильтру и повышения скорости сходимости алгоритма.

При реализации АСАГ с МОУ наиболее перспективным подходом является построение модели на основе минимальной априорной информации об объекте управления, например, геометрии помещения, материале покрытий и расположении крупных предметов.

Обобщенный алгоритм идентификации передаточной функции. Для проведения идентификации в частотной области передаточной функции может быть использована следующая модель, созданная в среде MATLAB (рис. 5) [10].

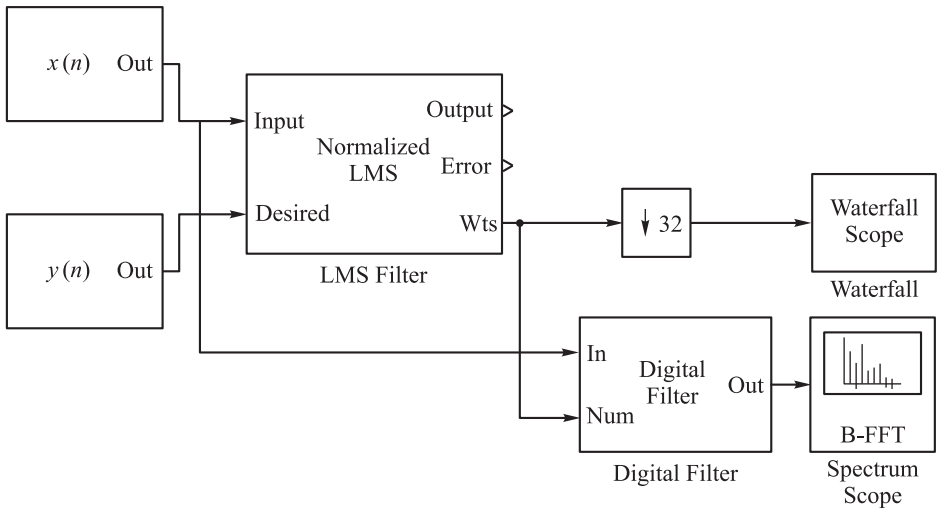


Рис. 5. Модель для идентификации передаточной функции с использованием алгоритма наименьших средних квадратов (НСК, LMS), созданная в среде MATLAB:

$x(n)$ — входное воздействие (шум); $y(n)$ — отклик объекта управления (помещения)

В рассматриваемом случае после настройки адаптивного алгоритма найденные коэффициенты передаются в цифровой фильтр. Порядок фильтра определяется уровнем сигнала ошибки. Модель реализована в виде фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра) 256 порядка с тактовой

частотой 800 Гц. Коэффициенты фильтра получены усреднением по последним 10 итерациям адаптивного фильтра. Отклик в частотной области синтезированной модели вторичного канала для помещения, трехмерная трассерная модель которого представлена на рис. 2, приведен на рис. 6, а. Отклик в частотной области для этого же помещения, полученный экспериментально методом офлайн-моделирования, показан на рис. 6, б.

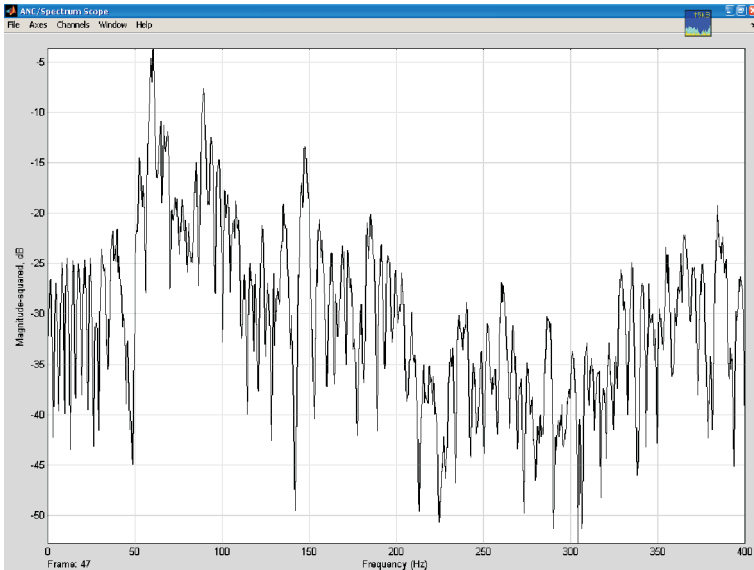
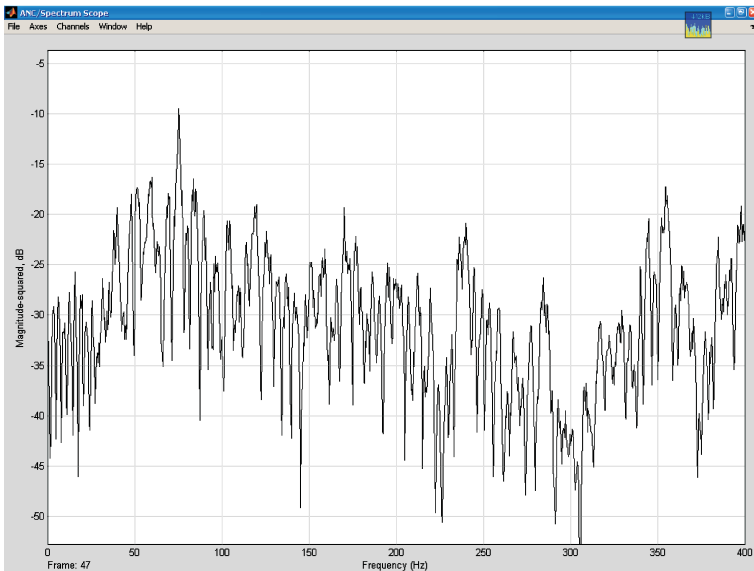
*а**б*

Рис. 6. Отклик в частотной области акустической передаточной функции помещения, полученный при моделировании трассерным методом (а) и экспериментально методом офлайн-моделирования (б)

При моделировании с высокой степенью достоверности оценены собственные частоты основных модальных компонентов. Различия наблюдаются лишь в соотношении их амплитуд.

Для оценки эффективности разработанных моделей использована среда MATLAB (рис. 7). В этой модели синтезированные передаточные функции представлены в виде цифровых фильтров (блоки Digital Filter). На вход системы

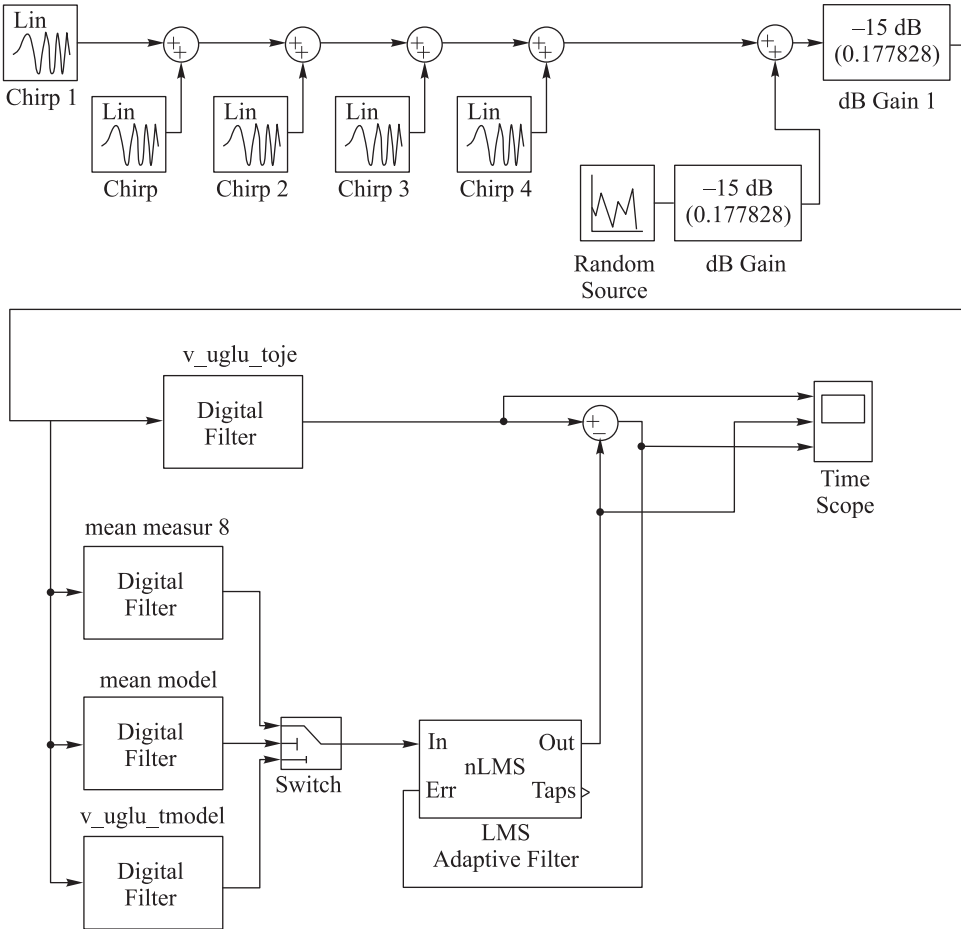


Рис. 7. Модель для оценки эффективности различных моделей передаточных функций, созданная в среде MATLAB

подают полигармонический сигнал плавающей частоты с числом гармоник от 1 до 5 и со скоростью развертки 40 и 20 Гц/с. К полигармоническому сигналу подмешан белый шум с относительным уровнем -15 дБ. В качестве эталонного объекта управления применена экспериментальная модель, описывающая передаточную функцию при расположении источника и приемника в противоположных углах помещения.

Результаты моделирования приведены на рис. 8. Предложенные модели обеспечивают при небольшом числе гармоник во входном сигнале в среднем на

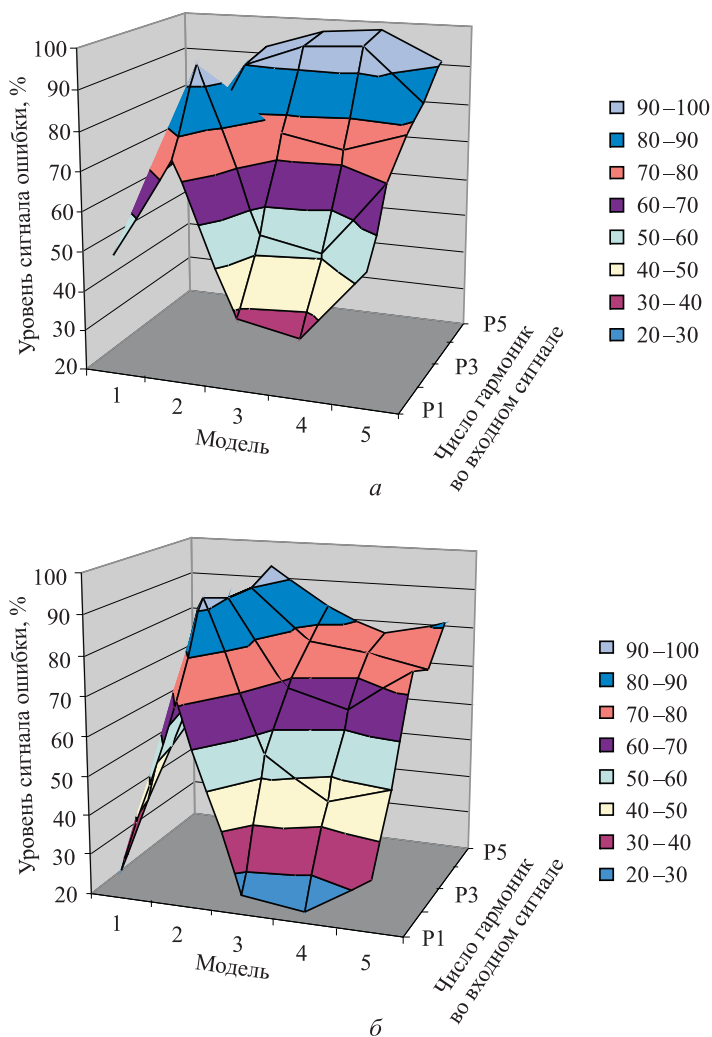


Рис. 8. Зависимость относительного уровня сигнала ошибки от используемой модели при значениях скорости развертки полигармонического сигнала 40 (а) и 20 (б) Гц/с:

1 — экспериментальная модель при измененном расположении предметов в помещении; 2 — экспериментальная модель, полученная методом усреднения по четырем точкам помещения; 3 — теоретическая модель, полученная методом усреднения по четырем точкам помещения; 4 — теоретическая модель для заданной точки; 5 — без модели вторичного канала; P1-P5 — число гармоник во входном сигнале

30 % меньший уровень сигнала ошибки по сравнению с усредненной по нескольким точкам экспериментальной моделью и на 10 % по сравнению со структурой без модели. При большом числе гармоник во входном сигнале и скорости развертки 20 Гц/с эффективность предложенных моделей на 10...15 % превышает эффективность усредненной по нескольким точкам экспериментальной модели.

Полученные результаты позволяют продемонстрировать эффективность применения современных трассерных и лучевых методов при моделировании акустических передаточных функций для помещений сложной формы, в том

числе находящихся на этапе проектирования. Адекватность синтезируемых указанными методами моделей сравнима с экспериментальными результатами, полученными путем усреднения по нескольким точкам [12].

Заклучение. Полученные результаты позволили синтезировать модели передаточных функций для АСАГ шума медицинского оборудования и энергетических установок. Проведенное исследование демонстрирует эффективность методов моделирования передаточных функций для различных акустических объектов и позволяет реализовывать на их основе высокоэффективные САГ шума в помещениях сложной формы. Причем с развитием как математического аппарата, используемого в этих методах, так и вычислительных платформ, выполняющих расчет массивов данных, адекватность синтезируемых моделей будет возрастать [13].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Применение* алгоритма сеточной аппроксимации среды в адаптивных системах для активного подавления акустических шумов электронной аппаратуры / В.Г. Дудко, К.Д. Верейнов, В.А. Шахнов, А.И. Власов, А.Г. Тимошкин // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Автоматизированные системы управления производством и разработками. 1996. № 2. С. 45–49.
2. *Kristensen S.H.* Active noise cancellation in headsets Aalborg university. Institute of Electronic Systems // Applied Signal Processing and Implementation. Technical Report. 1998. P. 122.
3. *Grylin P., Hedborg M.* Active noise control of a forest machine cabin // Technical Report. Institutionen for Systemteknik. Linkoping, 2007. 65 p.
4. *Jacobsen F.* The sound field in a reverberation room // Technical Report. Technical University of Denmark. Lyngby, 2006. 37 p.
5. *Walker R.* Low-frequency room responses // BBC Research Department Report. 1992. 25 p.
6. *Michael Vorländer* Auralization. Fundamentals of acoustics, modelling, simulation. Algorithms and acoustic virtual reality. Springer, 2008. 348 p.
7. *Власов А.И.* Современное состояние и тенденции развития теории и практики активного гашения волновых полей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 1997. № 12. С. 59–70.
8. *Семенцов С.Г.* Применение адаптивных алгоритмов для моделирования передаточной функции вторичного канала систем активного гашения шума // Информационно-управляющие системы. 2009. № 2. С. 24–27.
9. *Семенцов С.Г., Юркевич Е.В., Воронцова Т.Е.* Системы обеспечения функциональной надежности технологических процессов с помощью активного гашения акустических полей // Надежность. 2012. № 2 (41). С. 56–64.
10. *Власов А.И., Семенцов С.Г.* Системный анализ на основе моделирования передаточных функций вторичного канала для систем активного гашения шума авиационной техники // Авиакосмическое приборостроение. 2008. № 10. С. 43–49.
11. *Власов А.И.* Особенности построения систем автоматизированного синтеза и моделирования средств защиты от влияния волновых полей // Информационные технологии. 1997. № 9. С. 31–38.

12. Власов А.И., Володин Е.А., Семенцов С.Г., Шахнов В.А. Электронные системы активного управления волновыми полями: история и тенденции развития // Успехи современной радиоэлектроники. 2002. № 4. С. 3–23.

Семенцов Станислав Григорьевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Байкина Лейла Рашатовна — инженер компании IntegrIT (Российская Федерация, 141002, Московская обл., Мытищи, ул. Колпакова, д. 2).

Половинкина Татьяна Владимировна — инженер-программист АО «Корпорация «ВНИИЭМ» (Российская Федерация, 105187, Москва, ул. Вольная, д. 30).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Семенцов С.Г., Байкина Л.Р., Половинкина Т.В. Оценка адекватности математических моделей акустических передаточных функций для помещений с произвольной геометрией // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 5. С. 14–25. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-5-14-25

ESTIMATION OF CONFORMITY FOR ROOM ACOUSTIC TRANSFER FUNCTION MODELS

S.G. Sementsov¹

siemens_off@mail.ru

L.R. Baykina²

linka9389@mail.ru

T.V. Polovinkina³

po_tatka@mail.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² IntegrIT, Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation

³ Research and Production Corporation Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper discusses methods of modeling the acoustic transfer functions for systems of active noise cancellation. For the purpose of this study we considered rooms with arbitrary shape. Based on a priori information about the managed object we proposed a new approach to modeling. Our work shows the high efficiency of tracer methods in modeling the transfer functions in the rooms of any shape. Finally, we assessed the conformity of the proposed models for various input types

Keywords

Acoustic transfer function, ray-tracing analysis, identification

REFERENCES

[1] Dudko V.G., Vereynov K.D., Shakhnov V.A., Vlasov A.I., Timoshkin A.G. Application of algorithm of net approximation of the environment in adaptive systems for active suppression of acoustic noise of the electronic equipment. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya proizvodstvom i razrabotkami* [Problems of radio electronics. Ser. Automated production management and development systems], 1996, no. 2, pp. 45–49 (in Russ.).

- [2] Kristensen S.H. Active noise cancellation in headsets Aalborg university. Institute of Electronic Systems. *Applied Signal Processing and Implementation. Technical Report*, 1998. P. 122.
- [3] Grylin P., Hedborg M. Active noise control of a forest machine cabin. *Technical Report*. Institutionen for Systemteknik. Linkoping, 2007. 65 p.
- [4] Jacobsen F. The sound field in a reverberation room. *Technical Report*. Technical University of Denmark. Lyngby, 2006. 37 p.
- [5] Walker R. Low-frequency room responses. *BBC Research Department Report*, 1992. 25 p.
- [6] Michael Vorländer Auralization. Fundamentals of acoustics, modelling, simulation. Algorithms and acoustic virtual reality. Springer, 2008. 348 p.
- [7] Vlasov A.I. State of the art and development trends of the theory and practice of wave field active damping. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 1997, no. 12, pp. 59–70 (in Russ.).
- [8] Sementsov S.G. Adaptive algorithms application for secondary path transfer function modeling in active noise control systems. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2009, no. 2, pp. 24–27 (in Russ.).
- [9] Sementsov S.G., Yurkevich E.V., Vorontsova T.E. Systems ensuring the functional reliability of technological processes by active suppression of acoustic fields. *Nadezhnost'* [Dependability], 2012, no. 2 (41), pp. 56–64 (in Russ.).
- [10] Vlasov A.I., Sementsov S.G. Analysis of the systems basis of design of functions of transmissions of the second channel for systems of active extinguishing of noise of aviation technique. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making], 2008, no. 10, pp. 43–49 (in Russ.).
- [11] Vlasov A.I. Features of creation of systems of the automated synthesis and modeling of means of protection from influence of wave fields. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 1997, no. 9, pp. 31–38 (in Russ.).
- [12] Vlasov A.I., Volodin E.A., Sementsov S.G., Shakhnov V.A. Electronic systems of active management of wave fields: history and tendencies of development. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Achievements of Modern Radioelectronics], 2002, no. 4, pp. 3–23 (in Russ.).

Sementsov S.G. — Dr. Sci. (Eng.), Professor of Design and Technology of Electronic Equipment Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Baykina L.R. — engineer of IT company IntegrIT Ltd. (ul. Kolpakova 2, Mytishchi, Moscow Region, 141002 Russian Federation).

Polovinkina T.V. — software engineer of the Research and Production Corporation Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes (ul. Vol'naya 30, Moscow, 105187 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Sementsov S.G., Baykina L.R., Polovinkina T.V. Estimation of Conformity for Room Acoustic Transfer Function Models. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 5, pp. 14–25.
DOI: 10.18698/0236-3933-2016-5-14-25