



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 27 за 2016 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Рябенький В. С.

Активная защита
акустического поля
желательных источников от
внешнего шума в реальном
времени

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Рябенький В. С. Активная защита акустического поля желательных источников от внешнего шума в реальном времени // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2016. № 27. 15 с. doi:[10.20948/prepr-2016-27](https://doi.org/10.20948/prepr-2016-27)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-27>

Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук

В.С. Рябенский

**Активная защита акустического поля желательных источников
от внешнего шума в реальном времени**

Москва — 2016

Рябенкий В.С.

Активная защита акустического поля желательных источников от внешнего шума в реальном времени

Дается обзор принципиальных основ и современного состояния нового направления в теории математического моделирования устройств активной защиты акустического поля желательных источников звука в заданной подобласти пространства от внешнего шума в ходе однократно в реальном времени протекающего процесса распространения звука. Обзор сделан в связи с критическим анализом статьи С.В. Утюжникова (S.V. Utyuzhnikov. Real-time active wave control with preservation of wanted field // IMA J. Appl. Mathematics, 2014, 79, 1126–1138).

Ключевые слова: активная защита от шума, метод разностных потенциалов (МРП), текущая акустическая разведка (ТАР)

Victor Solomonovich Ryabenkii

Active protection of acoustic field of wanted sources from external noise in real time

We present the review of fundamental principles, the modern state and implemented applications of a new direction in the theory of mathematical modeling of devices for active protection of a subdomain from external noise in real time on the base of the difference potential method and the current acoustic exploring. The review is made in connection to the justification of our critical analysis of the recent Utyuzhnikov's paper (S.V. Utyuzhnikov. Real-time active wave control with preservation of wanted field // IMA J. Appl. Mathematics, 2014, 79, 1126–1138).

Key words: active noise protection, difference potential method (DMP), current acoustic exploring (CAR)

Введение

В работе дан обзор нового направления в теории активной защиты от шума, основанного автором на базе метода разностных потенциалов (МРП) и текущей акустической разведки (ТАР). Обзор дополнен критической рецензией на статью С.В. Утюжникова (S.V. Utyuzhnikov. Real-time active wave control with preservation of wanted field. IMA J. Appl. , 2014, 79, 1126–1138). В дальнейшем ссылки на эту статью обозначены как [U0].

1. О новом направлении в теории активной защиты от шума

1.1. Общие сведения

Пусть звук распространяется в некоторой области пространства, в которой выделена некоторая подобласть. Задачи активной защиты акустического поля в данной подобласти от внешнего шума состоят в создании дополнительных источников звука – динамиков, расположенных в окрестности границы подобласти, звук которых экранирует акустическое поле внутри подобласти от внешнего шума.

Классической задачей о защите является случай, когда внутренние источники отсутствуют или когда создаваемое ими поле в окрестности границы известно. Этой задаче посвящено много статей и несколько монографий, и мы эту задачу не рассматриваем.

1.2. Задача о защите желательного акустического поля от внешнего шума в реальном времени и основной результат

Пусть источники звука, расположенные в заданной подобласти, создают желательный звук, а источники, расположенные вне подобласти, создают нежелательный шум. Для наглядности будем говорить о задаче защиты разговора в комнате с открытым окном от уличного шума с помощью дополнительных источников звука, которые осуществляют активную защиту и расположены вбли-

зи границы защищаемой комнаты, т.е. в проеме окна. Ниже приведены основные результаты, полученные при решении данной задачи.

В части 6 монографии [14] построена математическая модель технических устройств для защиты акустического поля желательных источников в заданной подобласти от влияния нежелательных источников в ходе однократно в реальном времени протекающего акустического процесса.

В этой математической модели текущее управление дополнительными источниками звука, обеспечивающими ослабление шума в заданное число раз, основано на обработке только практически доступной текущей информации. Используется только знание суммарного акустического давления в окрестности границы («в проеме окна») всех источников звука (желательных, шумящих и осуществляющих экранирование), а также состояние акустической среды вблизи границы защищаемой подобласти («в проеме окна»). При этом текущее давление измеряется с помощью микрофонов; свойства среды – измерением температуры, влажности, скорости ветра «в проеме окна» с помощью термометра и других простых измерительных приборов.

Благодаря доступности управляющей информации, эту информацию можно использовать в ходе реализации управления на практике. Всю дополнительную информацию о форме области, условиях на внешней границе составной области (в нашем примере – информация о расположении и форме зданий, форме комнаты и условиях на их границах, об акустических свойствах среды вне проема окна) устройство автоматически получит и обработает, используя разведку шумом, которая осуществляется синхронно ходу процесса.

В рассматриваемом примере устройство зависит только от размеров прямоугольного окна и поэтому может изготавливаться на заводе большими сериями.

Ниже сформулированная проблема упоминается как задача 1.2.

Первый шаг в направлении решения проблемы 1.2 сделан в [9], где задача 1.2 решена при дополнительном условии, что заранее известно, каким было бы

суммарное акустическое давление желательных и шумящих источников, если бы процесс протекал без вмешательства управления.

Решение проблемы 1.2 без каких-либо дополнительных условий получено лишь через 15 лет в монографии [14]. Это решение основано на восполнении результата [9] созданием алгоритма ТАР.

1.3. Справка об МРП

МРП впервые введен в [1] и существенно развит в дальнейшем. В [4] и [6] построены также поверхностные потенциалы с проекторами для линейных дифференциальных операторов. Теория как разностных, так и поверхностных потенциалов с проекторами изложена в частях 1 и 2 монографии [8].

Общим прообразом как разностных, так и поверхностных потенциалов с проекторами служит классический интеграл типа Коши из теории аналитических функций. Интеграл типа Коши можно интерпретировать как потенциал дифференциального оператора Коши-Римана, действующего в пространстве кусочно-регулярных комплекснозначных функций на комплексной плоскости со скачком на замкнутом контуре, где задана плотность интеграла Коши.

Новые возможности разнообразных приложений, доставляемые методом разностных потенциалов, возникают потому, что МРП объединяет некоторые свойства интегралов Коши с универсальностью и алгоритмичностью устойчивых разностных схем.

Замечание. Подчеркнем, что поверхностные потенциалы с проекторами для дифференциальных операторов общего вида, построенные в [4], [6] и [8], не могут быть непосредственно использованы для конструктивных приложений. Поверхностные потенциалы предварительно должны быть аппроксимированы какими-либо дискретными конструкциями. В этом состоит отличие и принципиальное преимущество именно разностных потенциалов перед любыми поверхностными потенциалами с проекторами в случае необходимости получить

конструктивное решение какой-либо прикладной проблемы с применением компьютеров.

Ключевое свойство разностных потенциалов, благодаря которому осуществляется защита от шумовой составляющей акустического давления по данным микрофонов о значениях суммарного акустического давления всех источников звука, состоит в том, что конструкция разностных потенциалов содержит проектор. Действие этого потенциала-проектора, плотность которого вырабатывается по данным, получаемым микрофонами, оставляет желательное (но неизвестное) слагаемое неизменным, а нежелательное (также неизвестное) слагаемое проецирует в нуль.

1.4. Новый факт математической физики и основанная на нем текущая акустическая разведка (ТАР)

Очевидно, что подлежащее управлению акустическое поле, также как и акустическое поле, получаемое в результате управления, зависит от формы области, где распространяется звук, от акустических свойств среды, которые в свою очередь зависят от пространственных координат и от времени (т.е. от температуры, влажности, скорости ветра, снега, облачности, расположения зданий и так далее), от условий на границе всей составной области (на земле, на стенах зданий, на стенах экранируемой комнаты) и поверхностях движущихся источников звука (говорящие люди в комнате, шумящие автомобили).

Поэтому может казаться удивительным, что приграничных данных (наблюдений «в проеме окна») достаточно для решения задачи 1.2, как впервые показано в части 6 монографии [14].

В монографии [14] установлено также, что имеет место соотношение взаимности защищаемой и шумящей подобластей, где распространяется звук. Это соотношение взаимности состоит в следующем. Если управление уменьшает величину вклада внешних источников в защищаемое поле в заданное число раз,

то вклад влияния желательных источников в акустическое поле в точках дополнительной подобласти увеличится ровно в то же самое число раз.

Сам факт достаточности приграничной информации для выработки управления дополнительными источниками, осуществляющими защиту, не был известен и представляет самостоятельный интерес.

На основе этого ранее неизвестного факта математической акустики в [14] создан конкретный алгоритм, который может служить математической моделью технического устройства и который я назвал текущей акустической разведкой (ТАР).

1.5. Недостаточность приграничных данных для управления полным подавлением шума в защищаемой подобласти

В [14] на страницах 413-415 и в [19] в п. 3.3 доказаны теоремы о недостаточности одних только текущих приграничных данных для активного управления в реальном времени полным подавлением шума в защищаемой подобласти.

1.6. Свойства ТАР

В части 6 монографии [14] впервые описан и строго обоснован алгоритм ТАР обработки текущих приграничных данных, который можно использовать как математическую модель устройств для защиты от шума. Этот алгоритм не требует какой-либо информации, которая не может быть получена наблюдениями в приграничной области ("в проеме окна"), за исключением знания, что речь идет об управлении звуком, распространение который является линейным процессом.

Важно подчеркнуть, что ТАР вырабатывает данные для управляющего импульса своевременно, т.е. раньше, чем этот математический продукт должен быть реализован устройством в виде управляющего сигнала дополнительных источников. Возможность своевременно выработать сигнал основана на обработке на практически мгновенной обработке на компьютере данных акустической разведки по простым формулам на основе использования какой-либо раз-

ностной схемы, аппроксимирующей дифференциальные уравнения акустики в окрестности границы ("в проеме окна"). Существо значения ТАР состоит в том, что этот алгоритм в текущий момент осуществляет расчет управления, которое должно быть реализовано динамиками несколько позже.

Осуществляемый предрасчет опирается на то, что скорость звука мала по сравнению со скоростью света и подобен телефонному сообщению гостя о том, что он выезжает. Поскольку гость приближается со скоростью используемого им транспорта ("скорость звука"), а телефонный звонок поступил "со скоростью света", у принимающего гостя хозяина возникает время для подготовки к приему гостя.

В рассматриваемой нами задаче защиты на основе ТАР роль телефонного предупреждения о предстоящем вскоре акустическом давлении на границе играют данные микрофонов, установленных на некотором расстоянии от границы по обе ее стороны ("в проеме окна"), которые переносятся в компьютер по проводам или радио, т.е. со скоростью света. Роль принимающего хозяина играет компьютер, который должен выработать управляющую динамиками команду. Роль скорости доставляющего гостя транспорта играет скорость звука в окрестности границы защищаемой подобласти.

1.7. Неулучшаемость алгоритма ТАР для активного управления уменьшением шума по текущим приграничным данным

Имеют место следующие три свойства ТАР, которые в совокупности означают, что ТАР нельзя существенно улучшить:

Свойство № 1. Приграничные данные, которые служат исходной информацией в постановке задач 1.2, вообще говоря, нельзя заменить более экономно получаемой информацией, например, данными измерений лишь по одну сторону границы защищаемой подобласти, так как эти данные не содержат информации, достаточной для выработки управляющих команд. Алгоритм выработки команд в этом случае не только станет неизвестен, но перестанет существовать.

Свойство №2. Алгоритм ТАР реализует возможность активно управлять уменьшением шума в защищаемой подобласти в любое число раз. В пункте 1.4 выше показано, что более совершенный алгоритм обработки приграничной информации, приводящий к управлению полным подавлением шума в защищаемой подобласти, не только неизвестен, но его просто не существует.

Свойство №3. Алгоритм ТАР доставляет подлежащую реализации команду на управляющее воздействие экранирующих источников несколько раньше того момента, когда эта команда должна быть выполнена реализующим экранирование устройством. Свойство №3 является важным условием технической возможности воспользоваться командой, которую вырабатывает ТАР на основе использования текущих приграничных данных. Если бы команда вырабатывалась без опережения, то было бы неизбежно запаздывание при ее технической реализации.

2. О статье С.В. Утюжникова

Возвратившись к работе после длительного перерыва, я прочел несколько статей С.В. Утюжникова, в которых он неверно излагает принципиальные основы, историю возникновения и современное состояние основанного мною нового направления в теории активного подавления шума, которое кратко описано выше. Я подробно проанализировал последнюю по времени появления статью [U0] и установил, что публикация не содержит научных результатов, но содержит ошибочные и некорректные утверждения. Этот анализ частично воспроизводится ниже.

2.1. Публикация С.В. Утюжникова [U0] не содержит научных результатов. В публикации предлагается некоторое решение задачи активного управления полным подавлением в реальном времени внешнего шума в защищаемой подобласти пространства на основе текущих приграничных данных.

Однако в 1.5 показано, что эта задача не имеет решения.

Таким образом, доказано, что конструкции С.В. Утюжникова в [U0] содержат неустранимую ошибку и не представляют научного интереса.

2.2. Публикация [U0] содержит ошибочные и некорректные утверждения. Мы процитируем и прокомментируем некоторые из этих утверждений.

Цитата №1. Последняя фраза в аннотации на стр. 1126: "Некоторые ограничения предложенного подхода также обсуждаются".

Комментарий № 1.

Автор цитаты ошибается, принимая полный информационный запрет на создание действующего устройства, реализующего его подход, за "некоторые ограничения". Этот запрет непосредственно следует из 1.5, и аналогичен запрету на создание "вечного двигателя", который следует из закона сохранения энергии.

Цитата № 2. С. 1127, 2-ой абзац сверху: "Впервые обсуждаемая нестационарная задача АС (активного управления) была поставлена в статье [Utyuzhnikov, S. V. (2009b) Non-stationary problem of active sound control in bounded domains. J. Comput. Appl. Math., 43, 101–112]".

Комментарий № 2.

На самом деле задача в абстрактной, то есть более общей, постановке впервые поставлена в [9] и [10]. Там же приведены формулы ее решения в предположении, что в окрестности границы защищаемой подобласти известно суммарное акустическое давление желательных и шумящих источников, создающих подлежащее управлению поле.

Во время своей поездки в Манчестерский университет в 2005 году в своих двух докладах и в многочисленных беседах с С.В. Утюжниковым я познакомил его с содержанием заметки [9]. Я просил С.В. Утюжникова с помощью его аспиранта Н.Lim'a создать лабораторную установку, реализующую общий алгоритм [9] в конкретном случае, когда устойчивая разностная схема аппроксимирует одномерные нестационарные уравнения акустики. Эта лабораторная уста-

новка была создана в Манчестерском университете. Эксперименты, проведенные на этой установке, подтвердили реализуемость абстрактной формулы из работы [9] в виде физического устройства, а также показали, что в случае 1-D уравнений акустики подтверждаются общие теоретические ожидания абстрактной работы [9].

Описание этой лабораторной установки и проведенных на ней экспериментов составляют содержание статьи [20], а также основное содержание доклада (Н. Lim, S.V. Utyuzhnikov and all) на Международном конгрессе по активной защите от шума в Osaka (Япония) в 2011 году.

Таким образом, утверждение, содержащееся в цитате № 2, некорректно.

Цитата № 3. Второй абзац снизу на с. 1127: "Локальное решение было недавно получено в работе Рябенского (2011) [Ryaben'kii V.S. .Model of real-time active noise shielding of a given subdomain subject to external noise sources. J. Comput.Math. Phys.,51,444–454] в разностной постановке. Однако это требует дополнительного решения одномерного уравнения и введения двух слоев вторичных источников, расположенных по обеим сторонам границы защищаемой области. Таким образом, перспективы практического использования подхода, предложенного Рябенским в цитированной работе, неясны".

Комментарий № 3.

Автор цитаты с ошибками описывает алгоритм решения задачи 1.2. Например, Рябенский вводит два слоя микрофонов, но не вторичных источников, как утверждает автор цитаты, который, по-видимому, не понял существа созданного для решения задачи 1.2 алгоритма ТАР. Далее, алгоритм ТАР впервые опубликован в части 6-й монографии [14], которая вышла в свет в 2010-м году, но не "недавно в 2011", как говорит автор цитаты. Отметим, что монография [14] в [U0] не упоминается.

Цитата № 4. В разделе 3 на с. 1129 приведены две цитаты: "Следуя работе Утюжникова (2009 с), введем оператор $P \dots$ " и "Авторы Рябенский (2002) и Утюжников (2009 с) ввели понятие четкого следа".

Комментарий № 4.

Понятия четкого следа, а также разностных и поверхностных потенциалов с проекторами P введены для линейных разностных и дифференциальных операторов около 30 лет назад соответственно в работах [3], [4], [6].

В работе А.А. Резника [5] получены неулучшаемые результаты об аппроксимации поверхностных потенциалов разностными в случае оператора Лапласа и его разностного аналога.

В работе М.И. Лазарева [7] понятие потенциалов с проекторами с плотностью из пространства четких следов было обобщено на случай абстрактных линейных операторов в банаховых пространствах.

Все перечисленные результаты изложены в частях 1 и 2 монографии [8] (1987). Однако С.В. Утюжников не упоминает о существовании всех этих работ, включая монографию [8], даже в списке литературы к публикации [U0].

Некорректность утверждения автора цитаты очевидна.

Цитата № 5. С. 1137. В разделе «Conclusion» говорится: "Общее решение нестационарной проблемы активной защиты получено благодаря теории CR потенциалов, и принципиальная новизна подхода состоит в том, что этот подход может быть реализован в режиме реального времени даже в случае присутствия желательных источников".

Комментарий № 5.

В п. 2.1 показано, что публикация [U0] вообще не содержит научных результатов.

Отметим дополнительно, что цитата №5 создает ошибочное впечатление, будто поверхностные CR-потенциалы (Calderon-Ryaben'kii's potentials) с проекторами, введенные С.В. Утюжниковым, являются новым инструментом в задачах защиты от шума. В действительности, поверхностным потенциалам с проекторами посвящены части 1 и 2 монографии [8]. Поверхностные потенциалы не используются В.С. Рябен'ким в задачах подавления шума, так как МРП и

ТАР доставляют общий самодостаточный подход, не засоренный ненужным в задачах защиты от шума упоминанием о поверхностных потенциалах.

Цитата № 6 (в конце [U0]): "Автор выражает благодарность профессору В.С. Рябенькому за плодотворные дискуссии".

Комментарий № 6.

Благодарность создает у рецензентов рукописи и читателей статьи впечатление, что В.С. Рябенький знает и одобряет исследования С.В. Утюжникова. В действительности С.В. Утюжников никогда не говорил мне о написанных или задуманных им статьях.

3. Заключительное замечание

Возвращаясь к обзору нового направления в теории активного управления звуком и подавления шума, составляющему основное содержание настоящего препринта, подчеркнем, что математический аппарат МРП и ТАР может быть применен не только к широкому кругу задач защиты от шума в воздухе и воде, но также и к задачам управления процессами распространения звука в средах, составленных различными материалами.

Аппарат МРП можно использовать также для апостериорного анализа сделанных с различными целями фонограмм в сочетании с той или иной дополнительной информацией.

Библиографический список

1. Рябенький В.С. Диссертация доктора физ.-мат. наук. – М.: Институт прикладной математики АН СССР. 1969.
2. Рябенький В.С. Метод внутренних граничных условий в теории разностных краевых задач // Успехи мат. наук. 1971. Т. 19. № 1. С. 105–160.
3. Рябенький В.С. Общая конструкция разностной формулы Грина на основе понятия четкого следа // Препринт ИПМ АН СССР. 1983. № 15.

4. Рябенский В.С. Обобщенные проекторы Кальдерона и граничные уравнения на основе концепции четкого следа // ДАН СССР. 1983. Т.270. № 2. С.288–292.
5. Резник А.А. Аппроксимация поверхностных потенциалов эллиптических операторов разностными потенциалами // Диссертация канд. физ.-мат. наук. – М.: МФТИ. 1983.
6. Рябенский В.С. Граничные уравнения с проекторами // УМН. 1985. Т.40. № 2. С. 221–239.
7. Лазарев М.И. Потенциалы линейных операторов и редукция краевых задач на границу // ДАН СССР. 1987. Т.252. № 4. С. 1045–1047.
8. Рябенский В.С. Метод разностных потенциалов для некоторых задач механики сплошных сред. –М.: Наука. 1987.
9. Рябенский В.С. Разностная задача экранирования // Функциональный анализ и его приложения. 1995. Т. 29. №1. С. 70–71.
10. Рябенский В.С. Нелинейная задача экранирования // УМН. 1995. Т.50. № 4. С.146.
11. Вейцман Р.И., Рябенский В.С. Разностные задачи экранирования и имитации //ДАН. 1997. Т. 354, № 2. С.151–154.
12. Рябенский В.С. Метод разностных потенциалов и его приложения. – М.: Физматлит. 2002. Англ. перевод: V.S. Ryabenkii. Difference potentials and its applications. Springer Verlag. 2002.
13. Рябенский В.С. Идея использования слабого шума для управления подавлением сильного шума в экранированной подобласти в реальном времени // ДАН. 2010. Т.430. № 2. С.166–168.
14. Рябенский В.С. Метод разностных потенциалов и его приложения. –М.: Физматлит. 2010. Издание третье.

15. Рябенский В.С. Подавление в реальном времени шума в защищаемой подобласти трехмерного пространства на основе информации от синхронной разведки шумом // ДАН. 2011. Т.439. № 3. С.319–322.
16. Рябенский В.С. Модель активного экранирования заданной подобласти от шума внешних источников в текущем времени // ЖВМ и МФ. 2011. Т.51. № 3. С.480–491.
17. Рябенский В.С. Синхронная разведка для управления подавлением шума в трехмерной подобласти пространства в реальном времени // ЖВМ и МФ. 2011. Т.51. № 10. С.1–16.
18. Рябенский В.С. Ключевая информация для управления решениями линейных разностных схем в составных областях // ДАН. 2012. Т.444. № 4. С. 376–377.
19. Рябенский В.С. Математическая модель устройств подавления внешнего шума в подобласти пространства // Мат. Моделирование. 2012. Т.24, № 8. С. 3–31. (In English: Math. model. and Comput. Simulations // 2012. Vol.5. № 2. P.103–121).
20. Lim H., Utyuzhnikov S.V., Lam Y.W., Turan A., Avis M.R., Ryaben'kii V.S. and S.V. Tsynkov. An experimental validation on the active noise control methodology based on difference potentials //AIAA J. 2009. Vol. 47. № 4. P. 874–884.