АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2006, том 52, № 5, с. 665–669

УДК 534.26

О ВЛИЯНИИ ОШИБОК НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ЛОКАЛЬНЫХ АКТИВНЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ ЗВУКА

© 2006 г. Н. Г. Канев

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника, 4
Тел.: (095) 126-9835; Факс: (095) 126-8411
E-mail: nickolay@imail.ru

Поступила в редакцию 02.09.05 г.

Исследуется влияние ошибок различного происхождения на эффективность поглощения звука активным локальным поглотителем. Показано, что снижение эффективности поглощения из-за ошибок минимально в том случае, если управляющий приемник не регистрирует поле вторичного излучателя. Даны оценки допустимых ошибок. Рассмотрено несколько конструкций активных поглотителей, в которых излучатель не воздействует на приемник.

PACS: 43.50.K

Из множества факторов, вызывающих отклонения режима работы системы активного гашения звука от требуемого, чаще всего выделяются следующие: ошибки показаний приемных устройств [1], неточности в подборе производительности излучающих устройств [2, 3], неточность распределения вторичных излучателей [4]. В случае локального гашения или поглощения [5], когда управление вторичным излучателем зависит только от звукового поля в его окрестности, решающими являются первый и второй из указанных факторов. Для исследования влияния ошибок в локальной постановке выделим задачу о максимизации поглощаемой мощности [6, 7].

Степень влияния ошибок различного происхождения на эффективность работы активной системы является важным критерием качества самой системы. Слабая устойчивость активной системы к ошибкам требует более точной настройки и, как следствие, более сложной схемы управления. Таким образом, знание предела устойчивости к ошибкам той или иной активной системы позволяет задать необходимую точность управляющих алгоритмов еще на этапе проектирования.

В настоящей работе исследуется влияние ошибок на эффективность поглощения звука простейшим активным устройством, в котором один излучатель управляется одним приемником. Сначала решается общая задача, а затем приводится несколько вариантов конструкции локальных активных поглотителей.

Рассмотрим задачу об активном поглощении излучателем малого волнового размера. Приемник располагается вблизи излучателя – расстояние между ними мало по сравнению с длиной волны. Пусть излучатель движется со скоростью V, зависящей от частоты. Уравнение движения излучателя запишем в следующем виде

$$(Z + Z_r)V = F_0 + F_a, \tag{1}$$

где F_0 – сила, действующая на излучатель со стороны падающей волны, F_a – сила, управляющая движением излучателя, Z_r – импеданс излучения, Z – механический импеданс излучателя. Выбор конкретных физических величин в качестве обобщенных сил $F_{0,a}$ и скорости V зависит от типа излучателя. Для монопольного и дипольного типов излучателя соответствующие величины указаны ниже. В практически используемых системах, как правило, механический импеданс излучателя существенно больше импеданса излучения. Поэтому введем ограничения, упрощающие дальнейшие выкладки,

$$|\mathrm{Re}Z| \gg |\mathrm{Re}Z_r|, \quad |\mathrm{Im}Z| \gg |\mathrm{Im}Z_r|. \tag{2}$$

Управляющая сила F_a формируется с помощью сигнала Q_s, регистрируемого приемником. Под Q_s может подразумеваться давление, или колебательная скорость, в зависимости от типа приемника. При этом измеряемое поле является суммой внешнего поля Q_0 и собственного поля излучателя Q_a. Под внешним полем подразумевается поле при неподвижном излучателе (во внешнее поле входит и поле дифракции на корпусе устройства).

Внешняя сила F_0 пропорциональна внешнему полю Q_0. Введем коэффициент T_0, который характеризует связь между этими величинами, т.е. $Q_0 = T_0F_0$.

Собственное поле излучателя Q_a пропорционально его обобщенной скорости V, т.е. $Q_a = T_a V$. Коэффициент T_a описывает акустическую связь между излучателем и приемником. Отметим, что коэффициенты T_0 и T_a зависят от свойств приемника и излучателя, а также от их взаимного расположения. Суммарный сигнал записывается в виде:

$$Q_s = T_0 F_0 + T_a V. \tag{3}$$

Сигнал с приемника формирует управляющую силу F_a посредством некоторой частотно-зависимой передаточной функции H:

$$Q_s H = F_a. \tag{4}$$

Для решения поставленной задачи необходимо найти значение передаточной функции, при котором поглощаемая мощность $W = \frac{1}{2}\mathrm{Re}[(F_0 - Z_r V)V^*]$ максимальна. Принимая фазу силы F_0 за нуль, перепишем последнее выражение в виде $W = \frac{1}{2}[F_0 \mathrm{Re}\, V - \mathrm{Re} Z_r |V|^2]$, откуда следует, что функция $W(V)$ достигает максимального значения при $\mathrm{Im}\, V = 0$. Амплитуду скорости находим из уравнения $\frac{dW}{dV} = \frac{1}{2}(F_0 - 2\mathrm{Re} Z_r V) = 0$, она равна $\tilde{V} = \frac{F_0}{2\mathrm{Re} Z_r}$ (см., например, [7]).

Подставляя этот результат в отношение (4) к (3) и учитывая (1), находим передаточную функцию, обеспечивающую оптимальную скорость V излучателя:

$$\tilde{H} = \frac{Z - Z_r^*}{2\mathrm{Re} Z_r T_0 + T_a}. \tag{5}$$

Волной обозначаются оптимальные значения скорости и передаточной функции, звездочкой – комплексное сопряжение.

Передаточная функция, связывающая сигнал с приемника и управляющую силу, может формироваться различными способами. В работе [8] управление излучателем осуществлялось с помощью фильтра с постоянными частотно-зависимыми характеристиками. В большинстве современных работ (см., напр. [9, 10]) предлагается использовать адаптивные методы, которые позволяют с помощью специальных алгоритмов подбирать требуемую зависимость передаточной функции от частоты. В настоящей работе вопросы реализации передаточной функции не рассматриваются, а сама оптимальная функция считается заданной.

При практической реализации точно обеспечить оптимальный режим непросто, поэтому необходимо оценить влияние ошибок на эффективность работы активного поглотителя. Введем безразмерную ошибку ε, которая изменяет управляющую силу следующим образом

$$Q_s \tilde{H}(1 - \varepsilon) = F_a. \tag{6}$$

Комплексная ошибка $\varepsilon = x + iy$ определяет амплитудные и фазовые отклонения от оптимального режима работы излучателя. Величина ε описывает как неточность измерения поля вблизи излучателя, так и неточность настройки управляющей функции. Точному режиму работы соответствует значение $\varepsilon = 0$.

Подставляя (5) и (6) в (1) с учетом (2), найдем зависимость скорости излучателя от ошибки ε:

$$V = \tilde{V}\frac{1 - \varepsilon}{1 - \dfrac{T_a}{2\mathrm{Re} Z_r T_0}\varepsilon}. \tag{7}$$

Как следует из (7), отклонение скорости излучателя от оптимального значения при неизменном значении ошибки ε тем меньше, чем меньше коэффициент связи T_a. В предельном случае $T_a = 0$, когда приемник не фиксирует поле излучателя, влияние ошибки ε минимально. Назовем такое положение приемника относительно излучателя оптимальным.

Выражение (7) позволяет определить диапазон допустимых ошибок E, при которых некоторая величина, характеризующая эффективность поглощения, например, сечение поглощения $\sigma = \sigma(\varepsilon)$, не менее некоторого заданного значения σ_0. Сечение поглощения определяется как отношение поглощаемой излучателем мощности W к плотности потока мощности падающей волны J_0. Другими словами, если $\varepsilon \in E$, то $\sigma > \sigma_0$. С уменьшением коэффициента связи T_a область E увеличивается, при оптимальном положении приемника ее размер максимален и определяется неравенством

$$x^2 + y^2 < \rho_0^2, \tag{8}$$

где $\rho_0 = \sqrt{1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{\max}}}$, $\sigma_{\max} = \frac{F_0^2}{8 J_0 \mathrm{Re} Z_r}$ – максимальное сечение поглощения, достигаемое при $\varepsilon = 0$. Таким образом, на плоскости xy границей области E является окружность с радиусом ρ_0.

Другим важным преимуществом конструкции активного поглотителя с оптимальным положением приемника является то, что в системах со стационарной передаточной функцией исключена возможность самовозбуждения [3].

Рассмотрим несколько примеров локальных активных поглотителей в свободном пространстве в поле плоской гармонической волны с амплитудой давления A и частотой ω. Поскольку мы ограничиваемся рассмотрением приемников и излу-

чателей только монопольного или дипольного типа, то удобно называть активный поглотитель в зависимости от типа приемника и излучателя. Например, диполь-монопольный поглотитель состоит из дипольного приемника и монопольного излучателя.

Начнем с монополь-монопольного активного поглотителя. Монопольный излучатель является пульсирующей сферой малого радиуса a, т.е. $ka \ll 1$, где k – волновое число. Сила, действующая на излучатель со стороны поля, равна $F_0 = -A$, обобщенная скорость равна объемной скорости излучателя $V = q$, а импеданс излучения равен [11]: $Z_r = R\frac{e^{ika}}{ika}$, где $R = \frac{k^2}{4\pi}\rho c$ – сопротивление излучения монополя, ρ – плотность среды, c – скорость звука в ней. Приемник расположим вблизи поверхности излучателя. Монопольный приемник фиксирует давление, следовательно, коэффициенты в (3) равны $T_0 = -1$ и $T_a = Z_r$. Подставляя данные значения в (7), находим объемную скорость монопольного излучателя

$$q = \tilde{q}\frac{1-\varepsilon}{1+\dfrac{\varepsilon}{2ika}}. \qquad (9)$$

Из (9) следует, что q значительно отличается от $\tilde{q}$, если абсолютное значение ошибки ε сравнимо с ka. Если требуемое значение относительной эффективности поглощения близко к 1, т.е. $\sigma_0 \longrightarrow \sigma_{\max}$, то допустимые ошибки задаются неравенством $x^2 + y^2 < (2ka\rho_0)^2$. Коэффициент акустической связи не зависит от положения приемника относительно излучателя, поэтому оптимального положения приемника не существует, а радиус области E уменьшается в $1/2ka$ раз по сравнению с максимально возможным ρ_0. Отметим, что с уменьшением волнового размера излучателя увеличивается влияние ошибок на эффективность поглощения.

Рассмотрим диполь-дипольный активный поглотитель (рис. 1). Дипольный излучатель является сферой малого радиуса a, осциллирующей со скоростью v. Угол между моментом диполя и волновым вектором падающей волны обозначим θ. Сила, действующая на излучатель со стороны поля [11], равна $F_0 = i\frac{4\pi}{3}ka^3A\cos\theta$, а импеданс излучения

$$Z_r = \frac{4\pi}{3}a^2\rho c\frac{(ka)^4 - i[2ka + (ka)^3]}{4 + (ka)^4}.$$

Приемник разместим вблизи поверхности излучателя таким образом, чтобы дипольный момент приемника был направлен вдоль дипольного момента излучателя. Положение приемника

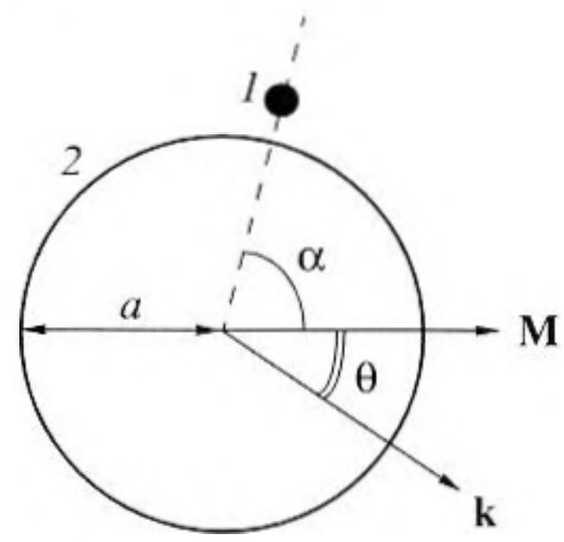

Рис. 1. Расположение приемника (*1*) относительно излучателя (*2*). **M** – момент дипольного излучателя, **k** – волновой вектор падающей волны.

относительно излучателя характеризуется углом α между направлением дипольного момента излучателя и прямой, соединяющей центры излучателя и приемника (рис. 1). Приемник фиксирует компоненту скорости среды, направленную вдоль его момента. Данная компонента скорости среды, обусловленной внешним полем, в точке расположения приемника равна $\frac{A}{\rho c}\cos\theta$, следовательно, первый коэффициент в (3) равен $T_0 = \frac{Q_0}{F_0} = -i\frac{3}{4\pi\rho cka^3}$. Проекция скорости среды, вызванной движением излучателя, на момент приемника равна $u = u_r\cos\alpha + u_\alpha\sin\alpha$, где u_r – радиальная компонента скорости, u_α – угловая. На поверхности сферы эти компоненты равны [11]: $u_r = v\cos\alpha$ и $u_\alpha = -\frac{v}{2}\sin\alpha$. Следовательно, выражение для коэффициента связи T_a имеет вид $T_a = \frac{u}{v} = f(\alpha) = \cos^2\alpha - \frac{1}{2}\sin^2\alpha$. Отметим, что оптимальная передаточная функция (5) не зависит от угла падения волны θ. Подставив полученные значения в (7), найдем скорость излучателя

$$v = \tilde{v}\frac{1-\varepsilon}{1 - 2if(\alpha)\dfrac{\varepsilon}{(ka)^3}}. \qquad (10)$$

Из (10) следует, что для диполь-дипольного поглотителя влияние ошибки, в общем случае, сильнее, чем для монополь-монопольного. При максимальном значении коэффициента связи $T_a = f(0) = 1$ скорость излучателя существенно отличается от оптимальной, если $|\varepsilon| \approx (ka)^3$. Но для диполь-дипольного поглотителя существует оптимальное положение приемника относительно из-

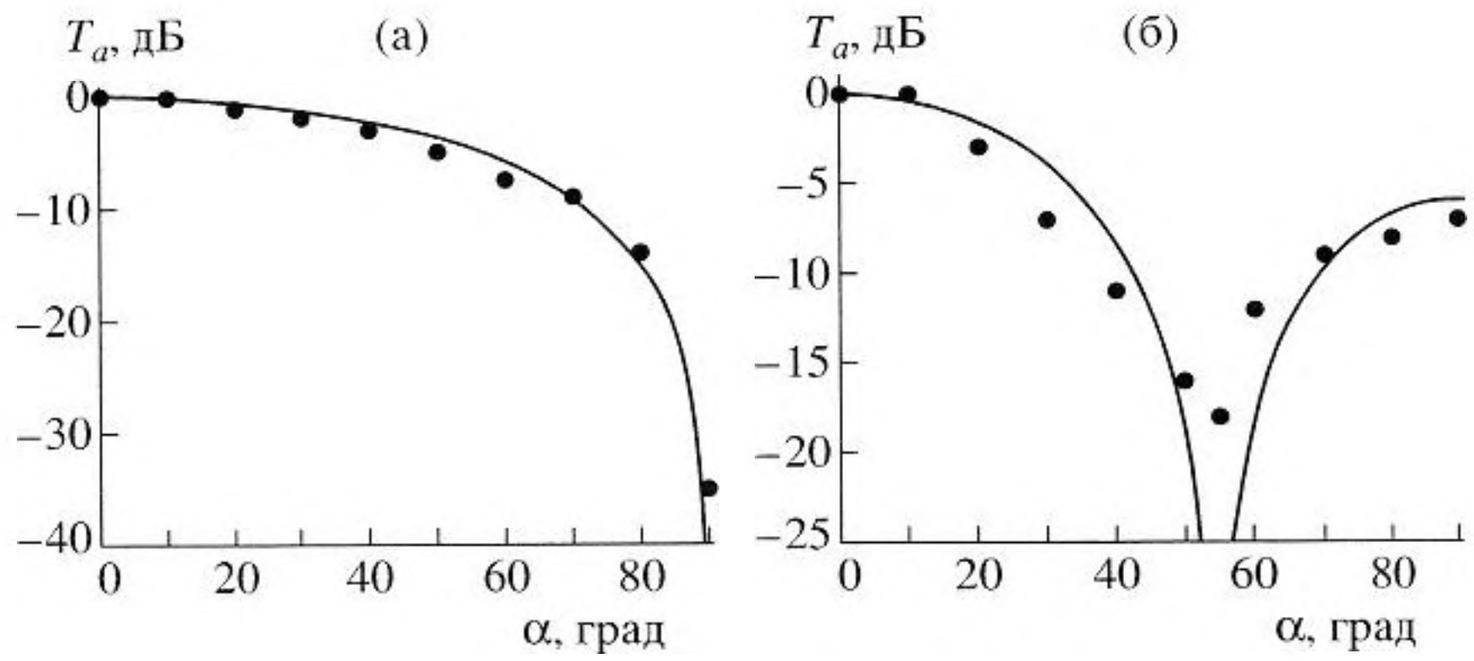

Рис. 2. Угловая зависимость коэффициента акустической связи дипольного излучателя с монопольным (а) и дипольным (б) приемником. Точки – измеренные значения, сплошная линия – расчет для сферического излучателя.

лучателя. Оно соответствует нулевому значению функции $f(\alpha)$, которое достигается при $\alpha = \arccos\frac{1}{\sqrt{3}}$. Таким образом, за счет правильного расположения приемника и излучателя можно существенно увеличить (примерно в $1/(ka)^3$ раз) допустимые ошибки для диполь-дипольного поглотителя до значений, определяемых (8).

Кратко рассмотрим монополь-дипольный и диполь-монопольный поглотители. Без выкладок очевидно, что в силу ортогональности монопольного и дипольного полей возможно расположение разнотипных приемников и излучателей, при котором приемник не фиксирует поле излучателя. В монополь-дипольном поглотителе приемник должен располагаться на прямой, проходящей через центр излучателя перпендикулярно его дипольному моменту. В диполь-монопольном поглотителе дипольный момент приемника должен быть перпендикулярен поверхности излучателя. В обоих случаях функция, описывающая акустическую связь между излучателем и приемником в свободном пространстве, имеет угловую зависимость вида $f(\alpha) = \cos\alpha$. Отметим, что в работе [12] для активной звукоизоляции волновода использовано подобное расположение разнотипных излучателей и приемников для упрощения системы гашения поля.

Главное отличие разнотипных комбинаций приемника и излучателя от однотипных заключается в том, что коэффициент T_0 в разнотипной комбинации, а следовательно, и оптимальная передаточная функция $\tilde{H}$ зависят от угла падения волны θ. Поэтому, если активный поглотитель настроен на максимальное поглощение волны, падающей под углом θ_0, то при других углах падения эффективность его работы уменьшается. Более того, при определенных углах θ и θ_0 возможен переход из поглощающего режима работы в излучающий. Аналогичная ситуация на примере плоских поглощающих активных систем продемонстрирована в [13].

В заключение приведем результаты экспериментального исследования, проведенного для оценки минимального значения коэффициента акустической связи между излучателем и приемником. В качестве образца был использован дипольный излучатель, который при управлении через монопольный приемник был успешно применен для гашения звука в узкой трубе [14]. На излучатель, расположенный в свободном пространстве, подавался гармонический сигнал с частотой 300 Гц, при этом волновой размер излучателя составлял $ka \approx 0.25$. Результат измерения угловой зависимости показаний дипольного и монопольного приемников, расположенных в ближнем поле дипольного излучателя, приведен на рис. 2. Максимальной чувствительности приемника соответствует $T_0 = 0$ дБ. Для монопольного приемника минимальное значение коэффициента связи составило –35 дБ при $\alpha = 90°$, а для дипольного –18 дБ при $\alpha = 55°$.

Основные результаты настоящей работы заключаются в следующем:

1. Устойчивость активного локального поглотителя к ошибкам настройки существенно зависит от взаимного расположения управляющего приемника и излучателя.

2. Активная система наименее чувствительна к ошибкам настройки, если приемник не фиксирует собственное поле излучателя.

3. Теоретически и экспериментально показана возможность такого расположения диполя-приемника и диполя-излучателя, при котором излучатель не влияет на показания приемника.

Автор выражает благодарность Миронову М.А. за полезные замечания, сделанные в ходе обсуждения настоящей статьи.

Работа выполнена при поддержке фонда INTAS (номер гранта 04-08-7043).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Федорюк М.Ф.* О работах Г.Д. Малюжинца по теории волновых потенциалов // Тр. Акуст. ин-та. 1971. Вып. 14. С. 169–179.
2. *Mangiante G.A.* Active sound absorption // J. Acoust. Soc. Amer. 1977. V. 61. № 5. P. 1516–1523.
3. *Урусовский И.А.* О самовозбуждении системы активной звукоизоляции в волноводе // Акуст. журн. 1977. Т. 23. № 3. С. 437–442.
4. *Завадская М.П., Урусовский И.А.* О влиянии неточности распределения источников на компенсацию поля при активном подавлении шума // VIII Всесоюзная акустическая конференция. М.: Наука, 1973.
5. *Nelson P.A., Curtis A.R.D., Elliott S.J., Bullmore A.J.* The minimum power output of free field point sources and the active control of sound // J. Sound Vib. 1987. V. 116. № 3. P. 397–414.
6. *Elliott S.J., Joseph P., Nelson P.A., Johnson M.E.* Active output minimization and power absorption in the active control sound // J. Acoust. Soc. Amer. 1991. V. 90. № 5. P. 2501–2512.
7. *Арабаджи В.В.* Локальные излучатели в режиме активного поглощения. Препринт № 320. Нижний Новгород ИПФ РАН, 1992.
8. *Olson H.F., May E.G.* Electronic sound absorber // J. Acoust. Soc. Amer. 1953. V. 25. № 12. P. 1130–1136.
9. *Orduna-Bustamante F., Nelson P.A.* An adaptive controller for the active absorption of sound // J. Acoust. Soc. Am. 1992. V. 91. № 5. P. 2740–2747.
10. *Мальцев А.А., Масленников Р.О., Хоряев А.В., Черепенников В.В.* Адаптивные системы гашения шума и вибраций // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 2. С. 242–258.
11. *Исакович М.А.*, Общая акустика. М.: Наука, 1973. С. 436.
12. *Урусовский И.А.* Об активной звукоизоляции волновода с излучателями – монополями и приемниками – диполями // Акуст. журн. 1980. Т. 24. № 2. С. 281–287.
13. *Тютекин В.В.* Модель плоской активной звукопоглощающей системы // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 2. С. 238–243.
14. *Гладилин А.В., Догадов А.А., Канев Н.Г., Миронов М.А.* Рассеяние звука резонансным диполем с обратной связью. Сборник трудов XIII сессии РАО. 2003. Т. 1. С. 276–279.

Effect of Errors on the Efficiency of Local Active Sound Absorbers

N. G. Kanev

Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences,
ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia
e-mail: nickolay@mail.ru

Abstract—Effect of errors of different origin on the efficiency of sound absorption by a local active absorber is investigated. Degradation of the efficiency of absorption because of the errors is shown to be minimal in the case when the controller does not detect the field of the secondary radiator. Estimates of admissible errors are presented. Several active absorber configurations in which the radiator does not affect the receiver are considered.