

О предельных возможностях систем активного гашения звуковых монохроматических сигналов

И. Ш. Фикс,^{*} Г. Е. Фикс

Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики РАН» (ИПФ РАН)

Россия, Нижний Новгород, 603950, Ульянова ул. 46

(Статья поступила 07.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Применительно к задачам звукоизоляции устройств, излучение которых в основном происходит на дискретных частотах, описана система активного гашения (компенсации) звука во внешнем пространстве. Принцип работы системы основан на создании системой управляемых излучателей компенсирующего поля, инверсного по отношению к полю первичного источника. Компенсирующее поле формируется на монохроматической частоте, совпадающей или достаточно близкой к частоте компенсируемого сигнала, которая должна быть известна или измерена заранее. Исследована эффективность системы при компенсации сигналов с неточно известной частотой.

PACS: 43.50.+y

УДК: 534.83

Ключевые слова: активное гашение звука, компенсация поля монохроматических источников.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционный путь решения задач активного гашения — снижение уровня звукового поля различных источников предполагает создание с помощью специальных излучателей поля, инверсного по отношению к полю этих (первичных) источников в заданной области или во всем пространстве [1, 2]. Учитывая значительные трудности, возникающие при реализации классических схем гашения, как правило, используют схемы, существенно ориентированные на специфику решаемой задачи. Так, например, имеется ряд задач по звукоизоляции установок, у которых основной вклад уровень излучения сосредоточен в дискретных спектральных компонентах, на частотах которых требуется осуществить компенсацию уровня поля [3, 4]. Для таких случаев была построена система активного гашения (САГ), ориентированная на компенсацию уровня монохроматических сигналов [5], которая по принципу управления может быть отнесена к системам с разомкнутой обратной связью с управлением по отклонению [6].

Целью работы является исследование эффективности САГ поля источников, излучающих монохроматический сигнал с неточно известной частотой.

1. ЗАДАЧА И АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ

Пусть в свободном пространстве расположен источник первичного излучения и охватывающая его гладкая поверхность Σ , на которой производятся измерения. Требуется по значениям давления, измеренного на поверхности Σ , с помощью управляемых излучателей, расположенных между первичным источником

и Σ (рис. 1), скомпенсировать поле вне Σ . При такой схеме отсутствие дипольных приемных элементов, не позволяющих факторизовать поле источников, не существенно, т.к. компенсируется поле от внутренних источников снаружи измерительной поверхности Σ .



Рис. 1: Схема системы компенсации

Упростим задачу. Во-первых, перейдем к дискретному измерению давления монопольными приемниками, полагая, что расстояние между соседними приемниками много меньше длины звуковой волны и характерных масштабов изменения первичного и компенсирующего полей на измерительной поверхности. Во-вторых, пренебрежем влиянием излучателей друг на друга и положим, что их объемная скорость (или амплитуда) прямо пропорциональна подводимому напряжению.

Обозначим комплексную амплитуду напряжения на n -ом излучателе u_n . Тогда зависимость поля от n -ого излучателя на m -ом приемнике от времени есть $A_{mn}u_n e^{i2\pi f_0 t}$, где A_{mn} известный (измеренный) коэффициент передачи поля от излучателя к приемнику. Величины u_n и A_{mn} будем рассматривать как элементы вектора $\mathbf{u}$ и матрицы A . Введем вектор-функцию $\mathbf{p}(t)$, элементы которой $p_m(t)$ — зависимости значений давления на приемных элементах от времени, и вектор $\mathbf{p} = T^{-1} \int_T \mathbf{p}(t) e^{-i2\pi f_0 t} dt$, элементы которого есть измеренные за время T значения амплитуд полей на частоте компенсации f_0 . Пусть, в об-

^{*}E-mail: fiks@appl.sci-nnov.ru

щем случае, при некотором напряжении u приемники регистрируют поле:

$$\mathbf{p}(t) = \bar{\mathbf{p}}(t) + A\mathbf{u}e^{i2\pi f_0 t}, \quad (1)$$

где $\bar{\mathbf{p}}(t)$ — поле первичного источника (здесь и далее величины, относящиеся к первичному источнику, будут отмечаться чертой сверху).

Сформулируем задачу компенсации как нахождение добавки δ к напряжению $\mathbf{u}$, которая минимизирует средний за время T квадрат нормы полного поля $\mathbf{p}(t)$ на приемниках $\Phi(\delta) = T^{-1} \int_T \|\mathbf{p}(t) + A\delta e^{i2\pi f_0 t}\|^2 dt$. Известно, что если полное поле на поверхности Σ от внутренних источников стремится к нулю, то и поле снаружи этой поверхности будет также стремиться к нулю [7]. Решение этой задачи:

$$\delta = -(A^H A)^{-1} A^H \mathbf{p}, \quad (2)$$

где A^H обозначает эрмитово сопряжение матрицы A . Исходя из этого, можно предложить следующий алгоритм работы системы компенсации, реализованный в [5].

Пусть до момента времени t_j на излучатели подавалось напряжение $\mathbf{u}_j$ и при этом измеренная на промежутке времени от t_{j-1} до t_j амплитуда поля на приемниках на частоте компенсации f_0 была $\mathbf{p}_j$. В момент времени t_j происходит изменение напряжения: к имеющемуся напряжению $\mathbf{u}_j$ добавляется напряжение δ_j . И напряжение, подаваемое на излучатель до следующего момента времени t_{j+1} , становится равным

$$\mathbf{u}_{j+1} = \mathbf{u}_j + \delta_j \quad \mathbf{u}_0 = 0, \quad (3)$$

где до момента начала компенсации $j = 0$ измеренное поле совпадает с полем давления от первичного источника. Последовательность основных операций управления системой компенсации следующая: ... — коррекция (изменение напряжения на величину δ_{j-1}) — измерение поля $\mathbf{p}_j(t)$ и его запись — вычисление на частоте f_0 амплитуды поля $\mathbf{p}_j$ и напряжения δ_j — коррекция (изменение напряжения на величину δ_j) — ...

Отметим, что чем меньше промежуток времени между коррекциями $t_j - t_{j-1}$, тем более широкополосной будет система компенсации. Из всех временных затрат наиболее важными для корректного вычисления напряжения δ_j являются длительность записи сигнала T и время распространения сигналов, которое определяется максимальным расстоянием от излучателя до приемника. Остальные затраты несущественны (время вычисления $\mathbf{p}_j$, δ_j , время необходимое для исключения влияния переходных процессов, как правило, малы). Таким образом, минимальное значение промежутка времени между коррекциями определяется временем T .

2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПЕНСАЦИИ

Положим, что расположение излучателей в пространстве, их тип и ориентация таковы, что в случае, когда частота излучения первичного источника совпадает с частотой компенсации, может быть обеспечено равенство нулю полного поля на измерительной поверхности. Это упрощение позволяет для рассматриваемой постановки задачи, не отвлекаясь на вопросы, связанные с качеством пространственной компенсации (частично эти вопросы были рассмотрены в [5]), исследовать эффективность системы компенсации в частотной области. Далее результаты расчетов и соответствующие величины будем приводить, опуская индекс j , и, подразумевая при этом, что число коррекций достаточно для выхода системы на стационарный режим.

Обозначим уровень скомпенсированного поля $s = (T^{-1} \int_T \|\mathbf{p}(t)\|^2 dt)^{1/2}$. Аппаратная функция системы компенсации $K(\alpha) = s/\bar{s}$ — зависимость нормированного уровня скомпенсированного поля от безразмерной величины отклонения частоты компенсации от частоты излучения первичного источника $\alpha = \pi(f_0 - f)T$, вычисляется аналитически и имеет вид, изображенный на рис. 2 (кривая 1). Компенсация с различной эффективностью происходит в полосе частот $\Delta_0 < 1/3T$, где $K < 1$, т.е. для $|f - f_0| < 1/6T$.

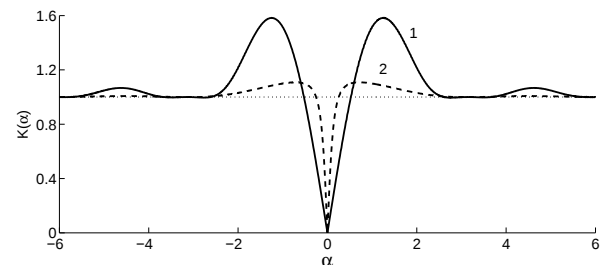


Рис. 2: Аппаратная функция системы компенсации

Введем $S(\Delta) = (\Delta^{-1} \int_{\Delta} s^2 df)^{1/2}$ — средний по полосе Δ уровень скомпенсированного поля и вычислим его значение в полосе компенсации Δ_0 . Можно показать, что в полосе Δ_0 величина среднего уровня $S(\Delta_0) \simeq \pi \Delta_0 T / \sqrt{3}$. Рассмотрим следующий пример. Пусть время между коррекциями T составляет 5 периодов частоты компенсации f_0 (практически минимально необходимое время для корректного вычисления значений амплитуды и фазы поля). Тогда величина полосы, в которой компенсация поля в среднем будет 20 дБ (или $S = 0.1$ при уровне $\bar{s} = 1$) составит $\Delta_0 \simeq 0.01f_0$. Отметим, что даже в этом, практически предельном случае, полоса компенсации весьма узкая.

С целью уменьшения величины боковых лепестков процедуру (3) можно несколько видоизменить, добавляя напряжение δ_j с некоторым весом β ($0 < \beta \leq 1$):

$$\mathbf{u}_{j+1} = \mathbf{u}_j + \beta \delta_j. \quad (4)$$

При этом происходит уменьшение, как уровня боковых лепестков, так и пропорционально β , полосы компенсации Δ_0 — рис. 2 (кривая 2). Заметим, что в общем случае значение $S(\Delta)$ зависит от величины β : $S(\Delta, \beta)$ и рассчитывается численно.

Рассмотрим случай, когда излучение первичного источника только шумовое. Положим, что его спектральная плотность мощности $w(f)$ не зависит от частоты: $w(f) = \varepsilon$, и выясним, что происходит с мощностью шумоизлучения $W(\Delta) = \int_{\Delta} w(f) df$ в полосе частот Δ при работе САГ. Можно показать, что после компенсации мощность шумоизлучения во всей полосе частот увеличивается на величину ε/T ; при этом значительная часть увеличения мощности ~ 0.81 приходится на полосу частот $\Delta_1 = 5/3T$, ограниченную первыми боковыми лепестками: $|\alpha| < (5/6)\pi$ — рис. 2 (кривая 1). В этой полосе мощность шумоизлучения возрастает в 1.5 раза или почти на 2 дБ.

Теперь исследуем эффективность компенсации в полосе Δ_0 в ситуации, когда первичный источник излучает аддитивную смесь монохроматического сигнала (амплитуды $\bar{p}$ с неизвестной частотой, лежащей в полосе Δ_0) и шумового сигнала. При компенсации такого сигнала происходит уменьшение его уровня в полосе Δ_0 , но одновременно возрастает мощность шумовой компоненты сигнала в широкой полосе. В общем случае полная мощность суммарного сигнала в полосе Δ до компенсации есть $W_{before} = \|\bar{p}\|^2 + \varepsilon \Delta$, после компенсации — $W_{after} = \|\bar{p}\|^2 S^2(\Delta_0, \beta) + \varepsilon S^2(\Delta, \beta) \Delta$. Для того чтобы система компенсировала поле первичного источника необходимо, чтобы для любой полосы частот Δ выполнялось неравенство $W_{after} \leq W_{before}$. Или для отношения сигнал/помеха на входе получим: $\|\bar{p}\|^2/\varepsilon \geq \Delta[S^2(\Delta, \beta) - 1][1 - S^2(\Delta_0, \beta)]^{-1}$. В частном случае: $\beta = 1$, $\Delta_0 \rightarrow 0$ получим, что при работе САГ суммарная мощность монохроматического и шумового сигнала во всей полосе частот при $\|\bar{p}\|^2/\varepsilon > 1/T$ уменьшится. При этом обеспечивается полная компенсация монохроматического поля, но мощность шумоизлучения возрастет, например, в полосе Δ_1 примерно в 1.5 раза. Уменьшение мощности шумоизлучения возможно за счет уменьшения величины β . Однако, для сохранения уровня скомпенсированного сигнала в полосе Δ_0 при работе САГ необходимо, чтобы отношение T/β было неизменным. Ниже приведены результа-

ты численного моделирования рассмотренной ситуации для случая, когда частота первичного сигнала 100 Гц совпадает с частотой компенсации.

На рис. 3 приведены спектры сигналов по мощности до компенсации — кривая 1 и после компенсации: кривая 2 при $\beta = 1$ и $T = 2.0$ с и кривая 3 при $\beta = 0.25$ и $T = 0.5$ с. Отчетливо видно, что в малой области около частоты компенсации кривые 2 и 3 совпадают, обеспечивая тем самым одинаковость величин при заданной Δ_0 . В широкой полосе интегральный уровень шумов после компенсации ниже при меньших значениях β . Таким образом, если имеется возможность, то при компенсации выгоднее (с точки зрения уменьшения

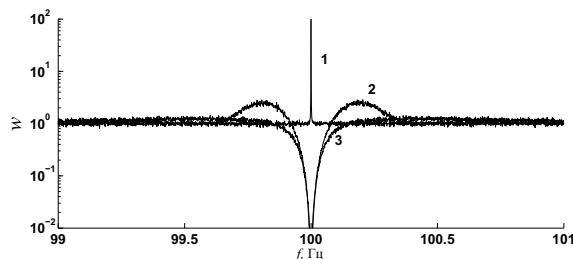


Рис. 3: Спектры сигналов

мощности шумовой компоненты и величины боковых лепестков) выбирать минимально возможное время T и использовать при компенсации процедуру (4) с соответствующим значением β , обеспечивающим требуемый уровень скомпенсированного сигнала в полосе Δ_0 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена САГ с разомкнутой обратной связью, принцип работы которой основан на формировании по заданному алгоритму компенсирующих монохроматических сигналов. Исследована ее эффективность в случае, когда первичный источник излучает монохроматический сигнал с неточно известной частотой и шумовой сигнал.

Работа выполнена в рамках Госзаказа № 0035-2014-0010.

- [1] Nelson P. A., Elliot S. J. Active Control of Sound. London: Academic Press, 1991.
- [2] Elliott, S. J. Signal Processing for Active Control. London, UK, Academic Press, 2001.
- [3] Семенов С. Г. Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. 2008. **106**. С. 8.
- [4] Семенов С. Г. Вестник СГАУ. 2009. № 4. С. 237.
- [5] Фикс И. Ш., Коротин П. И., Потапов О. А., Фикс Г. Е.

- Акуст. журн. 2016. **62**, № 2. С. 208.
- [6] Власов А. И., Володин Е. А., Семенов С. Г., Шахнов В. А. Успехи современной радиотехники. 2002. № 4. С. 3.
- [7] Шендеров Е. Л. Излучение и рассеяние звука. Ленинград: Судостроение, 1989.

On extreme possibilities of active sound suppression systems monochromatic signals

I. Sh. Fiks^a, G. E. Fiks

¹*Federal Research Center The Institute of Applied Physics of RAS (IAP RAS). Nizhny Novgorod, 603950, Russia
E-mail: ^afiks@appl.sci-nnov.ru*

With regard to the problems of sound insulation devices, radiation which occurs mostly at discrete frequencies, describes a system of active damping (compensation) of sound in outer space. The principle of the system is based on the creation of a system of managed radiators compensating field, inverted relative to the field, the primary source. Compensating field is formed on a monochromatic frequency coinciding or sufficiently close to the frequency compensated signal, which must be known in advance or measured. The efficiency of the system when the signal compensation inaccurately known frequency.

PACS: 43.50.+y

Keywords: active sound suppression, compensation of monochromatic sources.

Received 07 July 2017.

Сведения об авторах

1. Фикс Иосиф Шлемович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: fiks@appl.sci-nnov.ru.
2. Фикс Галина Ефимовна — науч. сотрудник; e-mail: Galya-Fiks@ipfran.ru.