

Использование дифференциальных решеток микрофонов для подавления акустического шума

В. В. Глазков, И. В. Муратов

В данной работе рассмотрен вопрос подавления акустического шума, возникающего на входе микрофонной системы при работе в неблагоприятных условиях промышленной зоны. Предложены варианты построения дифференциальных решеток микрофонов, которые могут быть использованы для уменьшения входного шума. Показаны различия в обработке сигнала и производительности, преимущества и недостатки рассматриваемых систем.

Ключевые слова: дифференциальная решетка микрофонов, метод вычитания спектров, акустический шум.

1. Введение

В настоящее время существует большое количество задач, связанных с повышением качества акустического сигнала, получаемого с микрофона [1–3]. В первую очередь такая задача встречается при разработке мобильных устройств связи, но также она актуальна и для различных промышленных систем. Основная проблема заключается в том, что большинство микрофонов являются ненаправленными датчиками, т.е. суммарный сигнал на выходе обусловлен источниками звука со всех направлений. В результате при неблагоприятной обстановке промышленных зон полезный сигнал будет существенно зашумлен.

Существует несколько способов борьбы с этим явлением:

- формирование узконаправленной диаграммы направленности микрофона;
- компенсация принятого шума за счет вычитания шумовой составляющей.

Первый способ реализуется, как правило, с использованием одиночного микрофона, конструкция которого позволяет сформировать заданную диаграмму направленности. Однако такой подход требует существенных габаритов, а сам микрофон имеет большую стоимость. Также для получения диаграммы направленности в виде кардиоиды может использоваться набор из нескольких близко расположенных микрофонов.

Второй подход реализуется на основе нескольких ненаправленных микрофонов, но требует последующей обработки выходных сигналов этих микрофонов. Так как сейчас на рынке представлено большое количество МЭМС-микрофонов, то такие решения являются малогабаритными и относительно дешевыми [4, 5].

В основе большинства алгоритмов подавления шума по второму способу лежит оценка спектральной плотности мощности (СПМ) сигнала. При этом необходимо получать оценку СПМ шума без полезного сигнала и оценку СПМ смеси полезного сигнала и шума.

В данной статье описывается дифференциальная решетка первого порядка, содержащая три микрофона. Вместо ориентации максимума диаграммы направленности в сторону желаемого источника сигнала предлагается в эту сторону ориентировать ноль диаграммы. В этом

случае в выходном сигнале решетки остается только шум. Ниже будет описано, как используется этот подход при реализации метода вычитания спектров.

В статье описываются две системы, использующие дифференциальную решетку микрофонов и последующую обработку сигналов для подавления шума с помощью метода спектрального вычитания. Из-за разной геометрии двух решеток микрофонов требуемая предварительная обработка различна.

2. Описание метода вычитания спектров

Метод спектрального вычитания является хорошо известным методом подавления шума в частотной области [6]. В этом методе зашумленный входной сигнал преобразуется или с использованием преобразования Фурье на коротком временном интервале, или на основе банка узкополосных фильтров. Из полученной оценки спектра зашумленного сигнала вычитается шумовая составляющая. Затем модифицированный сигнал преобразуется обратно во временную область. Для того чтобы вычислить соответствующее ослабление, необходима оценка СПМ входного шума без полезного сигнала и оценка СПМ входного сигнала вместе с шумом.

Для оценки СПМ шума только с одного микрофона делается ряд предположений. Большинство из них хорошо работают со стационарным шумом, некоторые даже с медленно меняющимся нестационарным шумом [6], тогда как все системы на основе одного микрофона имеют большую ошибку оценки СПМ шума при одновременном изменении СПМ полезного сигнала. Эта проблема может быть решена с помощью микрофонных решеток, в которых используется пространственная информация о положении желаемого источника сигнала и шума. В этой статье показаны две системы с дифференциальными массивами микрофонов, способные точно оценить СПМ шума даже тогда, когда шум изменяется очень быстро.

3. Описание рассматриваемых систем

3.1. Геометрическое расположение и предварительная обработка

Обе рассматриваемые системы используют пространственную информацию для получения оценки СПМ шума. Чтобы эта оценка не зависела от уровня сигнала, поступающего с целевого направления, необходимо, чтобы в этом направлении диаграмма направленности имела ноль. Для всех остальных направлений чувствительность должна быть примерно такой же, как и чувствительность канала приема зашумленного сигнала.

Рассматриваемые системы объединяет то, что каждая из них состоит из трех близко расположенных микрофонов (рис. 1). Для первой системы микрофоны расположены в углах прямоугольного треугольника (вариант 1). Гипотенуза имеет длину $\sqrt{2}d$, другие стороны имеют длину d . Для второй системы (вариант 2) микрофоны расположены в углах треугольника с длиной d для всех сторон (рис. 1).

Для обеих систем пары сигналов на выходе микрофонов вычитаются друг из друга для получения градиентных сигналов. Эти градиентные сигналы фильтруются, преобразуются в частотную область, а затем возводятся в квадрат, чтобы получить оценку СПМ градиентного сигнала. На рис. 2 и 3 показана функциональная схема обработки сигналов для двух рассматриваемых вариантов. По СПМ двух градиентных сигналов для варианта 1 и трех градиент-

ных сигналов для геометрии 2 оценка СПМ шума проводилась сложением СПМ градиентных сигналов.

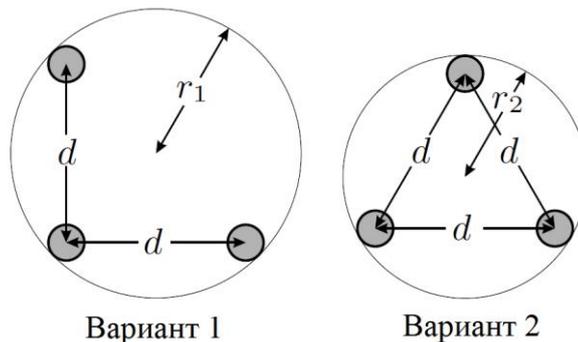


Рис. 1. Расположение и размеры рассматриваемых систем

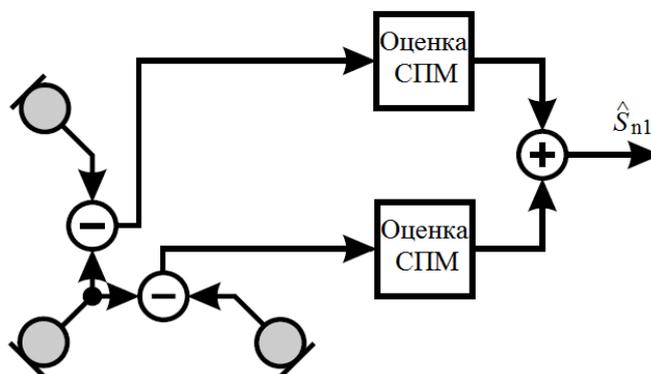


Рис. 2. Предварительная обработка для варианта 1

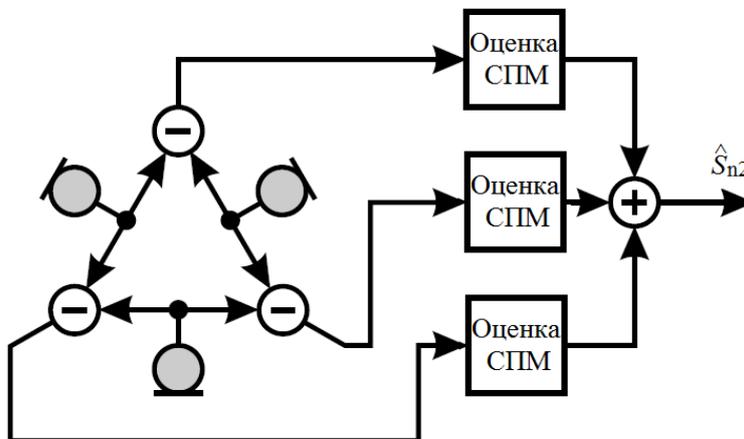


Рис. 3. Предварительная обработка для варианта 2

Хотя два варианта построения отличаются только положением одного микрофона, обработка, необходимая для получения адекватной оценки СПМ шума, отличается. Так как диаграмма направленности должна иметь вид кардиоиды с нулем в сторону желаемого источника сигнала (φ_0, θ_0) , то диаграмма направленности для дифференциальной пары микрофонов должна иметь форму гладкого тора для угла $\theta_0 = 0$. Далее будет показано, почему это приводит к различной обработке сигнала для разных вариантов расположения микрофонов.

3.2. Диаграмма направленности для низких частот

Источник звука, находящийся в направлении (φ, θ) , является причиной возникновения сигнала на выходе каждого микрофона, при этом СПМ обозначим как $S_{in}(f, k)$, где f – дискретная частота, k – дискретное время, меняется во времени.

СПМ градиентного сигнала вычисляется вычитанием СПМ сигнал с выхода микрофона i из СПМ сигнала, поступающего с выхода микрофона j :

$$S_{ij}(f, k) = 2S_{ex}(f, k)(1 - \cos(\psi_{ij})) = 4S_{ex}(f, k)\sin^2\left(\frac{\psi_{ij}}{2}\right), \quad (1)$$

где ψ_{ij} – сдвиг фазы между сигналами с двух микрофонов:

$$\psi_{ij} = 2\pi f \left(\frac{\Delta d}{V_{зв}} - \tau_{ij} \right), \quad (2)$$

где $V_{зв}$ – скорость звука в воздухе;

Δd – расстояние между двумя микрофонами d в зависимости от направления (φ, θ) и взаимной ориентацией по азимуту φ_{ij} :

$$\Delta d = d \cos(\varphi - \varphi_{ij}) \sin(\theta), \quad (3)$$

τ_{ij} – временная задержки между микрофонами i и j , которая может быть использована для наклона луча диаграммы направленности в направлении (φ_0, θ_0) :

$$\tau_{ij} = \frac{d}{V_{зв}} \cos(\varphi_0 - \varphi_{ij}) \sin(\theta_0). \quad (4)$$

Из уравнений (2), (3) и (4) результирующий фазовый сдвиг определяется:

$$\psi_{ij} = \frac{2\pi f d}{V_{зв}} [\cos(\varphi - \varphi_{ij}) \sin(\theta) - \cos(\varphi_0 - \varphi_{ij}) \sin(\theta_0)].$$

Тогда с учетом (1) СПМ шума определяется как:

$$S_n(f, k) = 4S_{ex}(f, k) \sum_{ij} \sin^2\left(\frac{\psi_{ij}}{2}\right) \quad (5)$$

для обоих вариантов. Для варианта 1 термы для суммирования включают в себя два элемента с индексами $\{21\}$ и $\{31\}$, а для варианта 2 – три элемента $\{21\}$, $\{31\}$ и $\{32\}$.

Используя аппроксимацию Тейлора первого порядка $\sin(x) \approx x$ при $x \ll \pi$, для области низких частот получим:

$$S_n(f, k) \approx S_{ex}(f, k) \sum_{ij} \psi_{ij}^2.$$

При $\varphi_{21} = 0$ и $\varphi_{31} = \frac{\pi}{2}$ для варианта 1 и с учетом:

$$\cos^2(x) + \cos^2\left(x + \frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (6)$$

СПМ шума (1) получается независимой от φ для $\theta_0 = 0$:

$$S_{1n}(f, k) \approx S_{ex}(f, k) \left(\frac{2\pi f d}{V_{3\theta}} \right)^2 \sin^2(\theta).$$

Это выражение соответствует диаграмме направленности в виде тора, симметричного относительно оси z . Зависимость от частоты f может быть легко компенсирована фильтром низких частот (т.е. использованием интегратора в блоке оценки СПМ).

При $\varphi_{21} = 0$, $\varphi_{31} = \frac{2}{3}\pi$ и $\varphi_{32} = \frac{4}{3}\pi$ для геометрии 2 получается тот же результат, но с бóльшим коэффициентом усиления, равным $3/2$, т.к.:

$$\cos^2(x) + \cos^2\left(x + \frac{2}{3}\pi\right) + \cos^2\left(x + \frac{4}{3}\pi\right) = \frac{3}{2}. \quad (7)$$

Таким образом, обе системы эквивалентны на низкой частоте. Можно показать, что это также справедливо и для $\theta_0 \neq 0$. Из уравнений (6) и (7) видно, почему требуется одно дополнительное суммирование терма в (5) для достижения желаемой диаграммы направленности в форме тора.

4. Числовое моделирование и анализ полученных результатов

4.1. Различия в результатах, связанные с геометрическим расположением

Из рис. 1 радиусы для различных вариантов расположения можно определить как:

$$r_1 = \frac{d}{\sqrt{2}} + r_c,$$

$$r_2 = \frac{d}{\sqrt{3}} + r_c,$$

где r_c – радиус чувствительного элемента микрофона. Исходя из формул видно, что для расположения микрофонов по варианту 2 требуется в $2/3$ раза меньше пространства, если пренебречь размером самих микрофонов.

С другой стороны, при расположении по варианту 1 за счет наличия угла 90° между микрофонами конструкция имеет преимущество в виде удобства ее размещения в углах прямоугольника. Кроме этого, для варианта 1 требуется немного меньше вычислительной производительности по сравнению с вариантом 2, так как требуется только два блока для расчета СПМ.

Для получения наилучшего результата при работе с дифференциальной решеткой микрофонов расстояние d должно быть выбрано очень тщательно. Если расстояние слишком мало, то возникают проблемы с шумовыми характеристиками и фазовыми ошибками [2], [8]. С другой стороны, коэффициент направленного действия уменьшается, если длина волны равна или ниже d .

На рис. 4 и 5 показана диаграмма направленности двух вариантов расположения микрофонов на плоскости $ХОУ$. Направление нуля также устанавливается в плоскости $ХОУ$ для углов $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ и φ_0 равным 0° и 30° соответственно. Расстояние между микрофонами d было равно 2 см для обоих вариантов. На каждом рисунке показано 9 диаграмм направленности для частот начиная с 500 Гц до 11.3 кГц с шагом в половину октаву. На графиках видно, что

диаграмма направленности имеет вид кардиоиды до частоты 5.6 кГц. На более высоких частотах до 8 кГц вариант 2 реализует форму кардиоиды немного лучше. Для более высоких частот обе геометрии имеют нежелательные побочные лепестки и нули. Также с увеличением частоты падает чувствительность, но это может быть легко компенсировано фильтрацией.

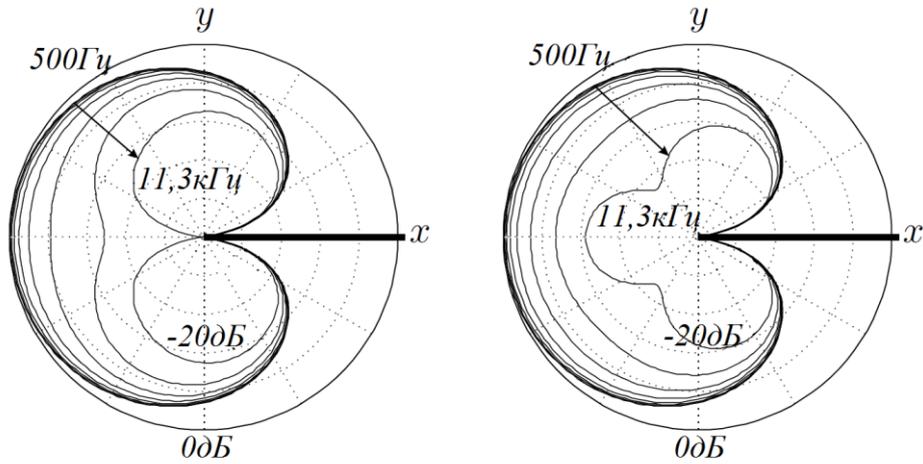


Рис. 4. Диаграмма направленности для вариантов 1 и 2 при $\varphi_0 = 0^\circ$

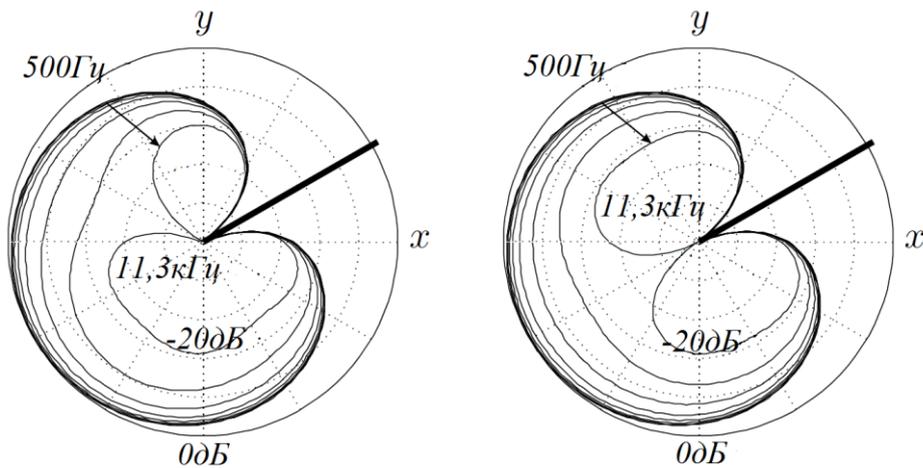


Рис. 5. Диаграмма направленности для вариантов 1 и 2 при $\varphi_0 = 30^\circ$

4.2. Возможности и ограничения предлагаемой системы

На рис. 6 показано, какая часть полезного сигнала и шума находится в выходном сигнале после обработки в зависимости от отношения сигнал/шум (ОСШ) на входе. Наклон характеристик сильно зависит от свойств входного сигнала, поэтому абсолютные значения на рисунке не приводятся. Видно, что при высоком ОСШ на входе шум на выходе гасится достаточно хорошо, в то время как полезный сигнал ослабляется незначительно. За счет этого происходит увеличение ОСШ на выходе. С уменьшением ОСШ на входе шум и полезный сигнал ослабляются более сильно. Если ОСШ на входе близко к единице, то затухание полезного сигнала становится слишком сильным. В этом случае система ослабляет все составляющие сигнала и не делает разницы между полезным сигналом и шумом.

Это общее поведение алгоритма спектрального вычитания необходимо учитывать при анализе диаграмм направленности.

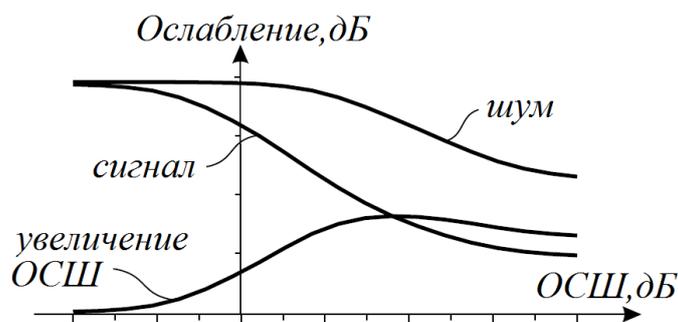


Рис. 6. Зависимость увеличения ОСШ на выходе от ОСШ на входе

Метод спектрального вычитания часто используют для компенсации искажений, известных как «музыкальный шум». В основном эти искажения являются результатом ошибок оценки СПМ шума. Системы на основе одного микрофона в принципе не могут оценить СПМ нестационарного шума. В результате при изменении шума по частоте или амплитуде появляются искажения. При использовании дифференциальных решеток микрофонов, описанных в данной работе, этот тип ошибок компенсируется.

5. Заключение

В данной статье сравнивались два варианта расположения микрофонов в дифференциальной решетке микрофонов. Вариант 1 требует меньше вычислительных затрат, в то время как вариант 2 обладает лучшими характеристиками в области высоких частот. Получена качественная оценка зависимости увеличения ОСШ на выходе в зависимости от значения ОСШ на входе. Оба варианта построения решетки позволяют подавлять шум и эхо-сигналы.

Литература

1. Хохлов В. К., Коришкова Ж. С. Пеленгация локализованного источника акустических излучений на основе знакового корреляционного метода // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2008. № 3. С. 66–74.
2. Хохлов В. К., Коришкова Ж. С. Пеленгация локализованного источника акустических излучений на основе спектрального метода обработки сигналов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2010. № 1. С. 62–73.
3. Лиходенко К. П., Хохлов В. К. Дискриминационные характеристики акустических пеленгаторов локализованных источников широкополосных излучений с временным способом обработки сигналов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19, № 6. С. 47–53.
4. Амеличев В. В., Вернер В. Д., Ильков А. В. МЭМС-микрофон. Выбор материалов, конструкции и технологии. Часть 1. Электромеханический чувствительный элемент // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 2. С. 53–62.
5. Амеличев В. В., Вернер В. Д., Ильков А. В. МЭМС-микрофон. Выбор материалов, конструкций и технологии. Часть 2. Влияние полости под диафрагмой на характеристики микрофона // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 27–36.
6. Saeed V. Vaseghi. Advanced digital signal processing and noise reduction. John Wiley & Sons Ltd, 2006. 453 p.

Глазков Виталий Владимирович

к.т.н., доцент кафедры автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, ул. 2-ая Бауманская, д. 5, стр. 1), тел. (499) 263-67-38, e-mail: wave@sm.bmstu.ru.

Муратов Игорь Валентинович

к.т.н., доцент кафедры автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, ул. 2-ая Бауманская, д. 5, стр. 1), тел. (499) 263-67-53, e-mail: muratow2007@yandex.ru.

Application of differential microphone arrays to reduce acoustic noise

Vitaly V. Glazkov, Igor V. Muratov

In the article, the question of suppression of acoustic noise generated at the input of the microphone system is considered. The variants of the differential microphone arrays geometry which can be used to improve the parameters of the system are shown. Differences in signal processing, and performance, advantages, and disadvantages of the systems are presented.

Keywords: differential microphone array, spectral subtraction, acoustic noise.