

## МИКРОФОННАЯ РЕШЕТКА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ НАПРАВЛЕННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

А. В. КРИВОШЕЙКИН, С. В. ПЕРЕЛЫГИН

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения,  
191119, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: sergey.pereygin@gmail.com*

Рассмотрен способ обработки сигнала в микрофонной решетке, состоящей из двух идентичных ненаправленных микрофонов. Сигнал получен от двух находящихся под разными углами к решетке источников широкополосных акустических сигналов. Предлагаемый способ обеспечивает направленный прием одного из сигналов и подавление второго. Выведены выражения для весовых коэффициентов решетки.

**Ключевые слова:** микрофонная решетка, акустическая антенна, узкополосный и широкополосный сигналы, спектры сигналов, взвешенное суммирование.

Для передачи и приема радиосигналов в радиосвязи, радиолокации, радиопеленгации и радионавигации используются антенные решетки, обеспечивающие заданную диаграмму направленности антенн. Для приема акустических сигналов применяются микрофонные решетки, формирующие заданную диаграмму направленности акустических антенн. Методы расчета антенных решеток основаны на использовании моделей приема либо гармонического, либо узкополосного сигнала. Акустические сигналы являются широкополосными.

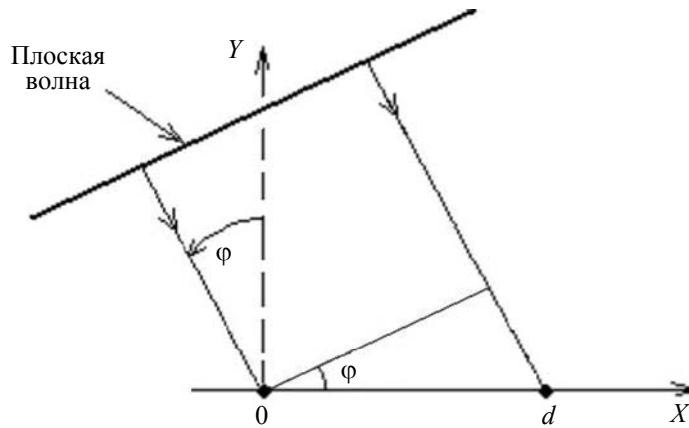
В настоящей статье рассматривается способ обработки акустического сигнала в микрофонной антенной решетке, состоящей из двух идентичных ненаправленных микрофонов. При наличии двух находящихся под разными углами к решетке источников широкополосных акустических сигналов предлагаемый способ обеспечивает направленный прием одного из сигналов и подавление другого.

Настройка микрофонной решетки на прием сигнала по одному или нескольким требуемым угловым направлениям осуществляется путем обработки сигнала в канале каждого микрофона и последующего взвешенного суммирования этих сигналов. Сама решетка при этом остается неподвижной: она не поворачивается к источнику сигнала, а настраивается на необходимый угол приема „электронным“ способом.

В самом общем случае настройка осуществляется введением линий задержки, компенсирующих временные рассогласования сигналов на выходах приемников. В случае приема узкополосного сигнала в канале каждого приемника производится выделение комплексной амплитуды сигнала и ее умножение на соответствующий взвешивающий коэффициент. В отличие от узкополосного сигнала с небольшим диапазоном изменения частот в спектре, для акустического сигнала, являющегося широкополосным, на разных частотах характерны разные соотношения между длиной акустической волны и фиксированным расстоянием между микрофонами. В результате на низких частотах решетка оказывается ненаправленной, а на высоких частотах имеет максимумы чувствительности при ложных угловых направлениях поступления сигнала [1, 2].

Рассмотрим случай, когда один источник широкополосного акустического сигнала с плоским волновым фронтом „воздействует“ на решетку, состоящую из двух одинаковых ненаправленных микрофонов (см. рисунок). Выберем положение осей координат так, чтобы оба

микрофона находились на оси  $X$ , при этом расположение левого (первого) микрофона совпадало с началом координат. Расстояние между микрофонами обозначим буквой  $d$ .



Если источник находится под каким-либо углом  $\varphi = -90 \dots +90^\circ$  к оси  $Y$ , то сигналы на выходе первого и второго микрофонов будут иметь временной сдвиг  $\tau$ , который, зная скорость распространения звука  $c$ , можно определить следующим образом:

$$\tau = \frac{d \sin \varphi}{c}. \quad (1)$$

Рассмотрим случай, когда на решетку „воздействуют“ два источника широкополосных акустических сигналов с плоскими волновыми фронтами, находящиеся под углами  $\varphi'$  и  $\varphi''$  к оси  $Y$ . Углы  $\varphi'$  и  $\varphi''$  могут быть заданы произвольно из диапазона  $-90 \dots +90^\circ$ .

Рассмотрим следующую задачу построения микрофонной антенной решетки:

- отклик решетки на первый источник сигнала с точностью до постоянной  $K$  должен быть равен отклику первого микрофона на сигнал первого источника;
- решетка **не** должна давать отклик на второй источник сигнала.

Для решения задачи предлагается заменить взвешенное суммирование сигналов во временной области, используемое при обработке узкополосных радиосигналов, взвешенным суммированием в частотной области.

Составляющие сигналов на выходе каждого микрофона — отклики на сигналы каждого из источников — и их спектры обозначим следующим образом:  $x_1'(t)$  — составляющая сигнала на выходе первого микрофона (отклик на сигнал первого источника),  $\dot{X}_1'(j\omega)$  — ее спектр ( $t$  — время,  $\omega$  — циклическая частота,  $j$  — мнимая единица);  $x_1''(t)$  — составляющая сигнала на выходе первого микрофона (отклик на сигнал второго источника),  $\dot{X}_1''(j\omega)$  — ее спектр;  $x_2'(t)$  — составляющая сигнала на выходе второго микрофона (отклик на сигнал первого источника),  $\dot{X}_2'(j\omega)$  — ее спектр;  $x_2''(t)$  — составляющая сигнала на выходе второго микрофона (отклик на сигнал второго источника),  $\dot{X}_2''(j\omega)$  — ее спектр.

Суммарный сигнал  $s_1(t)$  на выходе первого микрофона и его спектр  $\dot{S}_1(j\omega)$  определяются выражениями

$$\begin{aligned} s_1(t) &= x_1'(t) + x_1''(t), \\ \dot{S}_1(j\omega) &= \dot{X}_1'(j\omega) + \dot{X}_1''(j\omega). \end{aligned} \quad (2)$$

Аналогично суммарный сигнал  $s_2(t)$  на выходе второго микрофона и его спектр  $\dot{S}_2(j\omega)$  определяются как

$$\begin{aligned} s_2(t) &= x'_2(t) + x''_2(t), \\ \dot{S}_2(j\omega) &= \dot{X}'_2(j\omega) + \dot{X}''_2(j\omega). \end{aligned} \quad (3)$$

При этом составляющие  $x'_2(t)$  и  $x''_2(t)$  сдвинуты по времени относительно соответствующих составляющих  $x'_1(t)$  и  $x''_1(t)$  на величины  $\tau'$  и  $\tau''$ , которые рассчитываются в соответствии с выражением (1). Тогда соотношения для составляющих  $x'_2(t)$ ,  $x''_2(t)$  и их спектров  $\dot{X}'_2(j\omega)$ ,  $\dot{X}''_2(j\omega)$  имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} x'_2(t) &= x'_1(t - \tau') = x'_1\left(t - \frac{d \sin \varphi'}{c}\right); \\ x''_2(t) &= x''_1(t - \tau'') = x''_1\left(t - \frac{d \sin \varphi''}{c}\right); \\ \dot{X}'_2(j\omega) &= \dot{X}'_1(j\omega) \exp(-j\omega\tau') = \dot{X}'_1(j\omega) \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi'}{c}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\dot{X}''_2(j\omega) = \dot{X}''_1(j\omega) \exp(-j\omega\tau'') = \dot{X}''_1(j\omega) \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi''}{c}\right). \quad (5)$$

Подставив выражения (4) и (5) в уравнение (3), получим

$$\dot{S}_2(j\omega) = \dot{X}'_1(j\omega) \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi'}{c}\right) + \dot{X}''_1(j\omega) \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi''}{c}\right). \quad (6)$$

Взвешенная сумма спектров сигналов на выходе обоих микрофонов является откликом решетки в спектральной области и равна

$$\dot{S}(j\omega) = w_1(j\omega) \dot{S}_1(j\omega) + w_2(j\omega) \dot{S}_2(j\omega), \quad (7)$$

где  $w_1(j\omega)$  и  $w_2(j\omega)$  — весовые коэффициенты.

Подставляя выражения (2) и (6) в уравнение (7), получаем

$$\begin{aligned} \dot{S}(j\omega) &= w_1(j\omega) \left( \dot{X}'_1(j\omega) + \dot{X}''_1(j\omega) \right) + \\ &+ w_2(j\omega) \left[ \dot{X}'_1(j\omega) \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi'}{c}\right) + \dot{X}''_1(j\omega) \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi''}{c}\right) \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

В соответствии с поставленной задачей необходимо подобрать весовые коэффициенты, такие чтобы при подстановке их в выражение (8) выполнялось тождество

$$\dot{S}(j\omega) = K \dot{X}'_1(j\omega), \quad (9)$$

где  $K$  — произвольная постоянная.

Из выражений (8) и (9) следует соотношение

$$\begin{aligned} w_1(j\omega) \left( \dot{X}'_1(j\omega) + \dot{X}''_1(j\omega) \right) + \\ + w_2(j\omega) \left[ \dot{X}'_1(j\omega) \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi'}{c}\right) + \dot{X}''_1(j\omega) \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi''}{c}\right) \right] = K \dot{X}'_1(j\omega). \end{aligned} \quad (10)$$

Приравнивая коэффициенты при  $\dot{X}'_1(j\omega)$  и  $\dot{X}''_1(j\omega)$  в левой и правой частях выражения (10), получаем систему линейных уравнений относительно неизвестных функций  $w_1(j\omega)$  и  $w_2(j\omega)$ :

$$\left. \begin{aligned} w_1(j\omega) + \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi'}{c}\right) w_2(j\omega) &= K, \\ w_1(j\omega) + \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi''}{c}\right) w_2(j\omega) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

решая которую, найдем выражения для весовых коэффициентов:

$$w_1(j\omega) = \frac{K}{1 - \exp\left(j\omega \frac{d(\sin \varphi'' - \sin \varphi')}{c}\right)}, \quad (12 \text{ а})$$

$$w_2(j\omega) = \frac{-K \exp\left(j\omega \frac{d \sin \varphi''}{c}\right)}{1 - \exp\left(j\omega \frac{d(\sin \varphi'' - \sin \varphi')}{c}\right)}. \quad (12 \text{ б})$$

Таким образом, поставленная задача решена.

В целях проверки работоспособности рассмотренного метода было проведено моделирование в среде MatLab.

В качестве исходных данных для моделирования использовались два речевых сигнала, воспроизводимые одним диктором. Тем самым были созданы условия, когда оба источника излучают акустические широкополосные сигналы в одинаковом диапазоне частот.

На подготовительном этапе произвольно задавались углы  $\varphi'$  и  $\varphi''$ . Формировалась совокупность сигналов:  $x'_1(t)$  и  $x''_1(t)$  — сигналы, идентичные двум исходным;  $s_1(t)$  — их сумма;  $x'_2(t) = x'_1(t - \tau')$  и  $x''_2(t) = x''_1(t - \tau'')$  — сигналы, сдвинутые по времени относительно исходных на величины  $\tau'$  и  $\tau''$ , определяемые углами  $\varphi'$  и  $\varphi''$ ;  $s_2(t)$  — их сумма.

На этапе обработки вычислялись весовые коэффициенты по формулам (12 а) и (12 б). Методом выборок с помощью дискретного преобразования Фурье осуществлялся переход в частотную область:  $s_1(t) \rightarrow \dot{S}_1(j\omega)$ ,  $s_2(t) \rightarrow \dot{S}_2(j\omega)$ . Для спектров сигналов по каждой выборке производилось взвешенное суммирование в соответствии с формулой (7). В завершение данного этапа осуществлялся обратный переход из частотной области во временную  $\dot{S}(j\omega) \rightarrow s(t)$  и формировался результирующий сигнал из набора выборок.

На этапе субъективного оценивания результатов моделирования выполнялось сравнение сигналов  $s(t)$  и  $x'_1(t)$ .

В результате оценивания сигналов было установлено следующее:

- один речевой сигнал подавляется полностью;
- второй речевой сигнал претерпевает искажения, субъективно воспринимаемые на слух как тембральные;
- разборчивость речи не ухудшается.

Таким образом, согласно предложенному методу обработки широкополосного акустического сигнала для построения микрофонных решеток необходимо перейти из временной области в частотную область. При этом результирующий сигнал должен быть получен с помощью взвешенного суммирования спектральных составляющих сигналов с последующим переходом во временную область. Результаты моделирования показали, что предложенный

принцип работы с широкополосным сигналом при построении микрофонной решетки обеспечивает допустимые искажения сигнала на выходе решетки по сравнению с исходным сигналом, поступающим от источника полезного сигнала. При этом обеспечивается подавление сигнала одного из источников.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
2. Ермолаев В. Т., Флакман А. Г. Методы оценивания параметров источников сигналов и помех, принимаемых антенной решеткой: Учеб.-метод. материалы. Нижний Новгород: ННГУ, 2007. 98 с.

## Сведения об авторах

- Анатолий Валентинович Кривошейкин** — д-р техн. наук, профессор; СПбГИКиТ; кафедра радиотехники и информационных технологий; E-mail: krivav@yandex.ru
- Сергей Васильевич Перельгин** — аспирант; СПбГИКиТ; кафедра радиотехники и информационных технологий; E-mail: sergey.perelygin@gmail.com

Рекомендована кафедрой радиотехники и информационных технологий

Поступила в редакцию 30.07.14 г.

**Ссылка для цитирования:** Кривошейкин А. В., Перельгин С. В. Микрофонная решетка для реализации направленной акустической антенны // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 221—225.

## MICROPHONE ARRAY FOR DIRECTIONAL ACOUSTIC ANTENNA IMPLEMENTATION

A. V. Krivosheikin, S. V. Perelygin

Saint Petersburg State Institute of Cinema and Television, 191119, Saint Petersburg, Russia  
E-mail: sergey.perelygin@gmail.com

A new method of signal processing in microphone array is proposed. The array consisting of two identical omni-directional microphones is considered; the array receives signals from two broadband acoustic sources located in different angular positions relative to the array. The proposed method provides directional reception of signal from one source and attenuation of the other source signal. Mathematical expressions for microphone array weight coefficients are presented.

**Keywords:** microphone array, acoustic antenna, angular selectivity, narrowband and broadband signals, signal spectrum, weighted summation.

## Data on authors

- Anatoly V. Krivosheikin** — Dr. Sci., Professor; Saint Petersburg State Institute of Cinema and Television, Department of Radiotechnics and Information Technologies; E-mail: krivav@yandex.ru
- Sergey V. Perelygin** — Post-Graduate Student; Saint Petersburg State Institute of Cinema and Television, Department of Radiotechnics and Information Technologies; E-mail: sergey.perelygin@gmail.com

**Reference for citation:** Krivosheikin A. V., Perelygin S. V. Microphone array for directional acoustic antenna implementation // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 3. P. 221—225 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-221-225