

АЛГОРИТМЫ ДВУХЭЛЕМЕНТНОЙ МИКРОФОННОЙ РЕШЕТКИ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ В ПРИСУТСТВИИ КОГЕРЕНТНЫХ ПОМЕХ

Столбов М.Б., к.т.н., доцент кафедры речевых информационных систем Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, e-mail: stolbov@mail.ifmo.ru;

Перелыгин С.В., к.т.н., ассистент кафедры радиотехники и информационных технологий Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, e-mail: sergey.perelygin@gmail.com.

ALGORITHMS OF A TWO-ELEMENT MICROPHONE ARRAY FOR SPEECH ENHANCEMENT IN PRESENCE OF COHERENT INTERFERENCE

Stolbov M.B., Perelygin S.V.

The article addresses the problem of enhancing speech corrupted with additive coherent noise when observations from two microphones are available. Five algorithms for signal processing of microphone array based on a priori information about the directions of sources of target signals and interference are analyzed. A conclusion is made about the expediency of using adaptive versions of algorithms.

Key words: problem of enhancing speech, microphone array, additive coherent noise.

Ключевые слова: микрофонные решетки, двухэлементные микрофонные решетки, подавление когерентного шума, формирование нуля диаграммы направленности.

Введение

Микрофонные решетки (МР) применяются в решении многих задач обработки речевых сигналов:

- Пространственное разделение дикторов.
- Увеличение разборчивости речи в шумовой обстановке.
- Дистанционная запись речевой информации (distant speech acquisition).
- Системы ASR в автомобиле.
- Слух роботов и машин (Machine Listening, Robot audition).
- Автоматическое протоколирование совещаний.
- Киоски с речевым сервисом в общественных местах.
- Hands-free системы речевого управления (hands-free communication).

Двухэлементные микрофонные решетки (МР2) получили широкое применение благодаря своей простоте и возможности компактного размещения. Вопросам обработки сигналов МР2 посвящено большое число работ, например [1-4]. Основными задачами обработки сигналов МР2 является выделение целевых сигналов на фоне диффузного шума и аддитивных когерентных помех [5, 6]. Различают 2 типа архитектуры МР2 – broadside и endfire.

Данная работа посвящена задаче выделения целевого речевого сигнала в присутствии широкополосных когерентных помех с использованием МР2 типа broadside. Целью работы является анализ и сравнение различных алгоритмов обработки сигналов.

Работа посвящена задаче выделения речевых сигналов в присутствии аддитивных широкополосных когерентных помех с использованием двухэлементной микрофонной решетки с архитектурой broadside. Проанализированы пять алгоритмов обработки сигналов микрофонной решетки в частотной области, основанных на априорной информации о направлениях источников целевого сигнала и помехи. Сделан вывод о целесообразности использования адаптивных версий алгоритмов.

Для простоты понимания фундаментальных принципов рассмотрен простейший сценарий известного положения двух источников сигналов (целевого и помехи). Пример описания некоторых алгоритмов обработки во временной области для МР2 и двух источников содержится в книге [3]. В данной работе рассматриваются алгоритмы обработки сигналов в частотной области. Общая схема системы представлена на рис. 1.

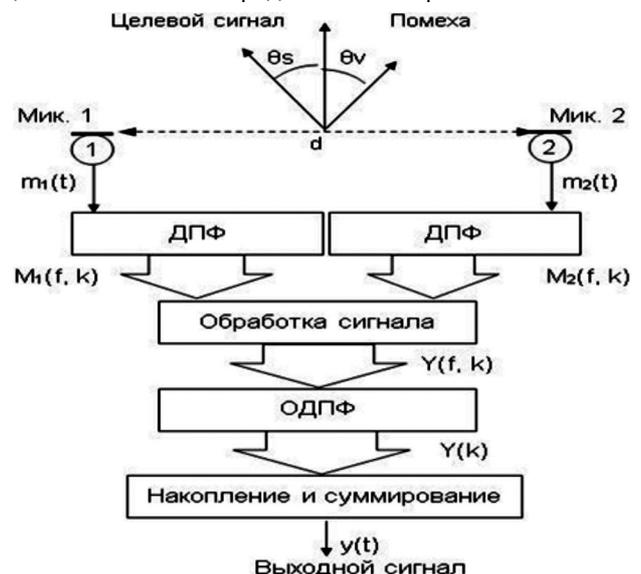


Рис. 1. Схема обработки сигналов МР2 в частотной области

Аналоговые сигналы $m_1(t)$, $m_2(t)$, формируемые микрофонами, преобразуются в цифровые сигналы с помощью АЦП с частотой дискретизации F_s . Далее эти сигналы преобразуются с использованием ДПФ в сигналы $M_1(f, k)$, $M_2(f, k)$ в частотно-временном представлении (STFT domain), где f, k – индексы частоты и кадра соответственно.

В следующих разделах рассмотрен ряд алгоритмов обработки сигналов МР2 в частотной области.

Модель сигнала микрофонной решетки и формулировка задачи

Рассмотрим модель формирования сигналов МР2 в случае прихода сигнала $X(f, k)$ с направления θ_x . Сигналы микрофонов в частотной области на кадре k могут быть записаны в следующем виде:

$$\mathbf{M}_x(f, k) = [M_1(f, k), M_2(f, k)]^T = X(f, k)\mathbf{D}_x(f),$$

где $\mathbf{D}_x(f)$ – вектор направления прихода сигнала. В дальнейшем в записи вектора направления и фазовых сдвигов (где это возможно) для краткости индекс частоты будем опускать.

Вектор направления описывает фазовые сдвиги сигналов на микрофонах, возникающие вследствие временных задержек прихода сигнала с указанного направления

$$\mathbf{D}_x = [e^{j\Phi_x}, e^{-j\Phi_x}]^T,$$

где Φ_x – фазовые сдвиги сигнала относительно точки центра между микрофонами:

$$\Phi_x = \pi d \cdot f \cdot \frac{\sin(\theta_x)}{c} = \pi d \cdot \frac{\sin(\theta_x)}{\lambda},$$

где θ_x – угол направления на источник сигнала относительно оси МР2, f – частота, соответствующая длине волны λ , d – расстояние между микрофонами, c – скорость звука.

Рассмотрим сценарий двух источников сигналов (целевого сигнала и помехи), поступающих с направлений θ_s и θ_v соответственно. Вектор сигналов микрофонов может быть записан в следующем виде:

$$\mathbf{M}_x(f, k) = S(f, k)\mathbf{D}_s + V(f, k)\mathbf{D}_v,$$

где $S(f, k)$ – целевой сигнал, $V(f, k)$ – помеха, \mathbf{D}_s , \mathbf{D}_v – вектора направления прихода целевого сигнала и помехи.

В общем случае сигналы могут поступать на МР с произвольных направлений. Связь между сигналом $X(f, k)$ с направления θ_x и сигналом $Y(f, k)$ на выходе МР характеризуется функцией пространственного отклика МР (модулем пространственной передаточной функции) [1]:

$$B(f, \theta_x) = \left| \frac{Y(f, k)}{X(f, k)} \right|.$$

Функция пространственного отклика описывает пространственную селективность МР. Другая характеристика (связанная с функцией пространственного отклика) – диаграмма направленности (ДН), характеризует соотношение мощностей входного и выходного сигналов.

Сформулируем основные требования к схеме обработки сигналов МР.

Во-первых, схема должна быть такой, чтобы пространственный отклик МР в направлении источника целевого сигнала был равен единице, а в направлении помехи – нулю.

Во-вторых, схема обработки сигналов МР не должна чрезмерно усиливать сигналы, поступающие на МР с произвольных направлений, то есть должна быть робастной по отношению к неточности местонахождения источников целевого сигнала и помехи.

Далее рассмотрен ряд алгоритмов обработки сигналов МР2, обеспечивающих выделение целевого сигнала и подавление когерентной помехи, использующих информацию о направлениях прихода целевого сигнала и помехи.

Алгоритм 1: формирование луча МР в направлении источника целевого сигнала

Пусть источник целевого сигнала расположен в направлении θ_s относительно оси МР. Тогда сигналы микрофонов могут быть представлены следующим образом:

$$\mathbf{M}(f, k) = S(f, k) [e^{j\Phi_s}, e^{-j\Phi_s}]^T.$$

Сигнал МР в данном алгоритме вычисляется как взвешенная сумма сигналов микрофонов

$$Y(f, k) = \frac{1}{2} \mathbf{W}^H(f) \mathbf{M}(f, k),$$

где (H) – символ сопряжения Эрмита.

Для формирования луча МР (основного лепестка ДН) в направлении источника целевого сигнала следует взять следующие весовые коэффициенты:

$$\mathbf{W}_s(f) = [e^{j\Phi_s}, e^{-j\Phi_s}]^T.$$

Комплексные весовые коэффициенты на каждой частоте компенсируют относительные фазовые сдвиги целевого сигнала, поступающего на микрофоны с направления θ_s , приводя их сигналы к общей фазе, не меняя амплитуды сигналов. В случае, когда целевой источник расположен на оси МР ($\theta_s = 0^\circ$) оба микрофона принимают одинаковый сигнал, при этом

$$\mathbf{W}_s(f) = [1, 1]^T.$$

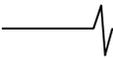
Рассмотрим пространственный отклик МР2 на сигнал $X(f, k)$, поступающий с направления θ_x . Сигнал на выходе МР будет следующим:

$$\begin{aligned} Y(f, k) &= \frac{1}{2} \mathbf{W}_s^H(f) \mathbf{M}(f, k) = \\ &= \frac{1}{2} X(f, k) [e^{j(\Phi_x - \Phi_s)} + e^{-j(\Phi_x - \Phi_s)}] = \\ &= X(f, k) \cos(\Phi_x - \Phi_s). \end{aligned}$$

Пространственный отклик МР определяется соотношением

$$B(f, \theta_x) = \left| \frac{Y(f, k)}{X(f, k)} \right| = |\cos(\Phi_x - \Phi_s)|.$$

Пространственный отклик сохраняет сигнал с целевого направления и ослабляет сигналы с других направлений в соответствии с диаграммой направленности: $B(f, \theta_s) = 1$, $B(f, \theta_v) = |\cos(\Phi_v - \Phi_s)|$. Диаг-



рамма направленности МР2 для алгоритма 1 ($d = 20$ см, $\theta_s = 45^\circ$) представлена на рис. 2.

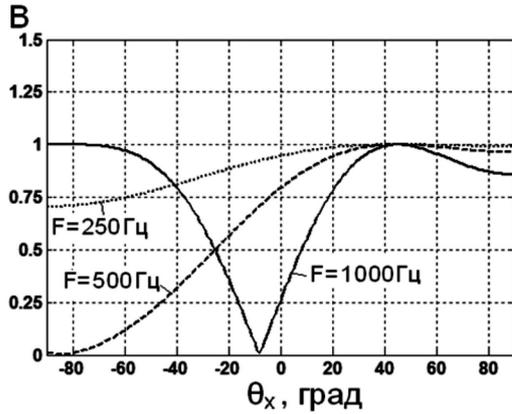


Рис. 2. Диаграмма направленности МР2 для алгоритма 1
Свойства алгоритма.

– Сигнал с целевого направления сохраняется полностью. Ошибки позиционирования положения целевого источника приводят к незначительному искажению целевого сигнала.

– Помехи поступают на выход МР через боковые лепестки и ослабляются в соответствии с характеристикой диаграммы направленности [5]. Данная схема МР позволяет одновременно подавлять множество когерентных помех, поступающих с различных направлений, отличных от целевого.

– Степень подавления помех в области НЧ и в случае близости угловых направлений источников помехи и целевого сигнала очень незначительная.

Алгоритм 2: формирование нуля ДН в направлении источника помехи

Известно, что с помощью микрофонной решетки из M микрофонов можно сформировать единичную функцию пространственного отклика в направлении источника целевого сигнала и до $(M - 1)$ нулей диаграммы направленности в направлениях источников помех [7]. В данной работе рассмотрены особенности этой схемы для простейшего случая МР2 с известными направлениями источника полезного сигнала и когерентной помехи [8].

Алгоритм основан на таком подборе комплексных коэффициентов фильтров, при котором помеха полностью подавлена, а целевой сигнал полностью сохранен.

Запишем сигналы микрофонов:

$$M1(f, k) = S(f, k)e^{j\Phi_s} + V(f, k)e^{j\Phi_v},$$

$$M2(f, k) = S(f, k)e^{-j\Phi_s} + V(f, k)e^{-j\Phi_v},$$

Взвешивание этих сигналов дает на выходе МР сигнал целевого источника

$$\begin{aligned} Y(f, k) &= W1^*(f)M1(f, k) + W2^*(f)M2(f, k) = \\ &= S(f, k) \left[W1^*(f)e^{j\Phi_s} + W2^*(f)e^{-j\Phi_s} \right] + \\ &+ V(f, k) \left[W1^*(f)e^{j\Phi_v} + W2^*(f)e^{-j\Phi_v} \right], \end{aligned}$$

где (*) – символ комплексного сопряжения.

Условие полного подавления помехи:

$$V(f, k) \left[W1^*(f)e^{j\Phi_v} + W2^*(f)e^{-j\Phi_v} \right] = 0$$

приводит к следующему решению:

$$W1(f) = e^{-j\Phi_v} / \Delta,$$

$$W2(f) = -e^{j\Phi_v} / \Delta,$$

$$\Delta = e^{j(\Phi_s - \Phi_v)} - e^{-j(\Phi_s - \Phi_v)} = 2 \sin[\Phi_s - \Phi_v] =$$

$$= 2 \sin \left[\pi d \cdot \frac{\sin \theta_s - \sin \theta_v}{\lambda} \right].$$

Проверка этого соотношения показывает, что на выходе такой МР формируется неискаженный сигнал целевого источника, а помеха полностью подавляется:

$$\begin{aligned} Y(f, k) &= ([S(f, k)e^{j\Phi_s} + V(f, k)e^{j\Phi_v}] \cdot e^{-j\Phi_v} - \\ &- [S(f, k)e^{-j\Phi_s} + V(f, k)e^{-j\Phi_v}] \cdot e^{j\Phi_v}) / \Delta = S(f, k) \end{aligned}$$

Полученное решение соответствует формированию нуля ДН в направлении источника помехи. Сигнал целевого источника, поступающий на выход МР через боковую лепесток ДН, усиливается до необходимого уровня со следующим коэффициентом усиления:

$$G(f) = \frac{1}{\Delta} = \frac{1}{2 \sin(\Phi_s - \Phi_v)}.$$

При определенных условиях величина этого коэффициента становится много больше единицы: $|G(f)| \gg 1$, что может привести к значительному усилению сторонних сигналов, приходящих с направлений, отличных от θ_s и θ_v .

Рассмотрим пространственный отклик МР на сигнал, приходящий с направления θ_x .

$$Y(f, k) = X(f, k)W^H(f)Dx.$$

Пространственный отклик МР определяется соотношением:

$$\begin{aligned} B(f, \theta_x) &= |W^H(f)Dx| = \left| \frac{\sin(\Phi_x - \Phi_v)}{\sin(\Phi_s - \Phi_v)} \right| = \\ &= \left| \frac{\sin[\pi d \cdot (\sin \theta_x - \sin \theta_v) / \lambda]}{\sin[\pi d \cdot (\sin \theta_s - \sin \theta_v) / \lambda]} \right|. \end{aligned}$$

Пространственный отклик сохраняет сигнал с целевого направления и формирует ноль в направлении помехи: $B(f, \theta_s) = 1$, $B(f, \theta_v) = 0$.

Если направления целевого сигнала и помехи близки ($\Phi_s = \Phi_v + \delta$), то возможно значительное усиление сигналов, поступающих на МР:

$$B(f, \theta_x) = \left| \frac{\sin(\Phi_x - \Phi_v)}{\sin(\delta)} \right|.$$

Диаграмма направленности МР2 для алгоритма 2 ($d = 20$ см, $\theta_s = 45^\circ$, $\theta_v = -30^\circ$) представлена на рис. 3.

Свойства алгоритма.

– Схема обработки сигналов МР заключается в формировании нуля передаточной функции в направлении помехи и восстановления амплитуды целевого сигнала, прошедшего через боковые лепестки, с помощью его усиления.

– Помимо основного источника помехи возможно присутствие многих других источников, сигналы которых данная МР подавлять не будет.

– В рассмотренной схеме возможно при определенных условиях значительное усиление сигналов, приходящих с направлений, отличных от θ_s и θ_v .

– Возможным решением проблемы чрезмерного усиления сигналов является ограничение величин весовых коэффициентов [8].

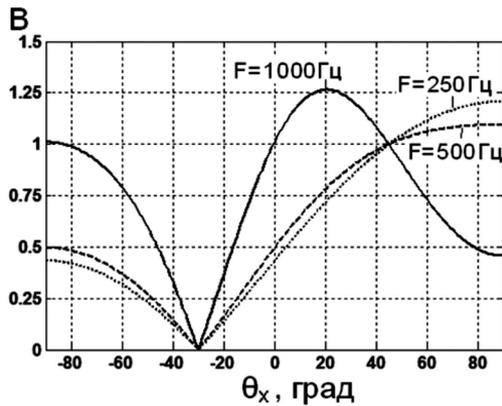


Рис. 3. Диаграмма направленности МР2 для алгоритма 2

Алгоритм 3: компенсация помехи, поступающей через боковые лепестки ДН

Рассмотрим схему формирования луча МР в направлении источника целевого сигнала и компенсации помехи, попадающей на выход МР через боковые лепестки ДН. Алгоритм получал название универсального подавителя боковых лепестков (Generalized Side-lobe Canceller, GSC) [9].

Рассмотрим схему с формированием двух сигналов. Основной и опорный сигналы формируются с помощью соответствующего взвешивания сигналов микрофонов.

Первый сигнал образуется формированием луча в направлении целевого источника:

$$Y1(f, k) = W_s^H(f) M(f, k) = S(f, k) + V(f, k) \cos(\Phi_v - \Phi_s).$$

В этом сигнале присутствует часть помехи, поступившей через боковые лепестки ДН.

Второй сигнал образуется формированием нуля в направлении целевого источника. Ноль может быть сформирован как разностный сигнал микрофонов при формировании луча в направлении целевого источника. Веса такой микрофонной решетки следующие:

$$W_o(f) = [C e^{j\Phi_s}, -C e^{-j\Phi_s}]^T.$$

где C – произвольная константа (обычно принимают $C = 1/2$).

Сигнал целевого источника с направления θ_s в этом случае полностью подавлен. Помеха с направления θ_v поступит на выход МР через боковые лепестки ДН:

$$Y2(f, k) = 0 + V(f, k) \sin(\Phi_v - \Phi_s).$$

Сигнал $Y2$ используется для компенсации помехи в сигнале $Y1$ и восстановления целевого сигнала:

$$Y(f, k) = Y1(f, k) - H(f) Y2(f, k) = S(f, k) + V(f, k) [\cos(\Phi_v - \Phi_s) - H(f) \sin(\Phi_v - \Phi_s)].$$

Из формулы следует, что для компенсации помехи фильтр $H(f)$ должен иметь следующую передаточную функцию:

$$H(f) = \frac{\cos(\Phi_v - \Phi_s)}{\sin(\Phi_v - \Phi_s)}.$$

Формула показывает, что для компенсации помехи

сигнал второго канала должен быть преобразован в соответствии с передаточной функцией фильтра $H(f)$. Из формулы следует, что при определенных условиях (направления источников сигнала и помехи близки) коэффициенты $H(f)$ компенсирующего фильтра могут принимать экстремально большие значения.

Оценим пространственный отклик микрофонной решетки.

$Y1(f, k) = X(f, k) \cos(\Phi_x - \Phi_s)$ – сигнал в канале луча.

$Y2(f, k) = 0 + V(f, k) \sin(\Phi_x - \Phi_s)$ – сигнал в канале нуля.

Тогда,

$$Y(f, k) = Y1(f, k) - H(f) Y2(f, k) = X(f, k) \cos(\Phi_x - \Phi_s) - X(f, k) \sin(\Phi_x - \Phi_s) \times \cos(\Phi_v - \Phi_s) / \sin(\Phi_v - \Phi_s).$$

Отсюда следует, что МР имеет следующий пространственный отклик:

$$B(f, \theta_x) = \left| \frac{\cos(\Phi_x - \Phi_s) - \sin(\Phi_x - \Phi_s) \times \cos(\Phi_v - \Phi_s) / \sin(\Phi_v - \Phi_s)}{\cos(\Phi_v - \Phi_s) / \sin(\Phi_v - \Phi_s)} \right|$$

Можно показать, что пространственный отклик для алгоритма 3 совпадает с пространственным откликом алгоритма 2:

$$B(f, \theta_x) = \left| \frac{\sin(\Phi_x - \Phi_v)}{\sin(\Phi_x - \Phi_v)} \right|.$$

Сформированный пространственный отклик сохраняет сигнал с целевого направления и формирует ноль в направлении помехи: $B(f, \theta_v) = 0, B(f, \theta_s) = 1$.

Свойства алгоритма.

- Сигнал с целевого направления поступает на выход МР целиком. Возможно полное подавление помехи и полная сохранность целевого сигнала.

- Искажения целевого сигнала могут быть вызваны неполной компенсацией помехи (вследствие неточного позиционирования источника).

- Возможны звуковые артефакты, вызванные чрезмерным усилением помехи в ветви компенсации.

- Возможна адаптивная реализация алгоритма компенсации помехи в отсутствии информации о ее положении.

Алгоритм 4: формирование нуля ДН в направлении источника помехи при максимальной сохранности целевого сигнала

Алгоритм для МР из M микрофонов удовлетворяет следующим условиям [10]:

$$W^H D_v i = 0, \quad i = 1, \dots, K_v;$$

$$W^H D_s \rightarrow \max$$

где $D_v i, \quad i = 1, \dots, K_v$ – вектора K_v направлений источников помех размерности $[M \times 1]$, D_s – вектор направления источника сигнала.

Оптимальный вектор весов, удовлетворяющий заданным условиям, определяется следующим соотношением [10]:

$$W_o = \left[I_{M \times M} - D_v (D_v^H D_v)^{-1} D_v^H \right] D_s,$$

где $I_{M \times M}$ – единичная матрица $[M \times M]$,

$$D_v = [D_{v1}, D_{v2}, \dots]^T.$$

Рассмотрим случай МР2.

$$\mathbf{D}_S = [e^{j\Phi_S}, e^{-j\Phi_S}]^T,$$

$$\mathbf{D}_V = [e^{j\Phi_V}, e^{-j\Phi_V}]^T.$$

Оптимальный вектор весов представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} W_0 &= \mathbf{D}_S - \mathbf{D}_V \langle \mathbf{D}_V \mathbf{D}_S \rangle / \langle \mathbf{D}_V \mathbf{D}_V \rangle = \\ &= \mathbf{D}_S(f) - \mathbf{D}_V(f) \cos(\Phi_S - \Phi_V) \end{aligned}$$

где $\langle \rangle$ – символ скалярного произведения векторов.

Таким образом, результирующий вектор весов равен исходному вектору направления на источник сигнала минус проекция этого вектора на вектор направления на источник помехи.

Пространственный отклик МР2 определяется следующим соотношением:

$$B(f, \theta_x) = |\cos(\Phi_S - \Phi_x) - \cos(\Phi_V - \Phi_x) \cos(\Phi_S - \Phi_V)|.$$

Пространственный отклик формирует ноль в направлении помехи и частично ослабляет сигнал с целевого направления: $B(f, \theta_V) = 0$, $B(f, \theta_S) = \sin^2(\Phi_S - \Phi_V)$.

Диаграмма направленности МР2 для алгоритма 4 ($d = 20$ см, $\theta_S = 45^\circ$, $\theta_V = -30^\circ$) представлена на рис. 4.

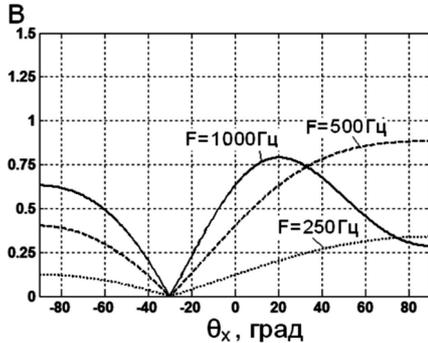


Рис. 4. Диаграмма направленности МР2 для алгоритма 4
Свойства алгоритма.

– Присутствует искажение целевого сигнала за исключением случая ортогональности векторов направления целевого сигнала и помехи.

– Возникает значительное подавление сигнала при сближении направлений сигнала и помехи в диапазоне низких частот.

Алгоритм 5: формирование нуля ДН по критерию MVDR

Частотная реализация метода Minimum Variance Distortionless Response (MVDR) обработки сигналов МР2 рассмотрена в работе [11]. В общем случае данный метод вычисления оптимального весового вектора использует информацию о направлении источника целевого сигнала и информацию о статистике сигналов помехи (вместо информации о направлении прихода помехи).

Рассмотрим этот алгоритм применительно к принятой модели сигнала. Запишем для каждой частоты выход МР:

$$Y(f, k) = \mathbf{W}^H(f) \mathbf{M}(f, k).$$

Оптимальные веса МР являются решением следующей оптимизационной задачи:

$$\text{Min } E \{ |Y(f, k)|^2 \} = \text{Min} [\mathbf{W}^H(f) \mathbf{R}_{VV}(f) \mathbf{W}(f)]$$

при условии $\mathbf{W}^H(f) \mathbf{D}_S(f) = 1$,

где $\mathbf{R}_{VV}(f)$ – ковариационная матрица помехи на микрофонах, $E\{\}$ – символ математического ожидания.

Ковариационная матрица определяется для каждой частоты следующим соотношением:

$$\mathbf{R}_{VV}(f) = E \{ \mathbf{M}^*(f, k) \mathbf{M}^T(f, k) \}.$$

Решение оптимизационной задачи приводит к следующему соотношению для вектора оптимальных весов [11]:

$$\mathbf{W}_0(f) = \mathbf{R}_{VV}^{-1}(f) \mathbf{D}_S(f) / (\mathbf{D}_S^H(f) \mathbf{R}_{VV}^{-1}(f) \mathbf{D}_S(f) + \sigma),$$

где σ – положительная константа, предохраняющая от деления на ноль.

Обычно корреляционная матрица и оптимальные веса оцениваются по экспериментальным данным. Вычислим оптимальные веса для сценария известного направления прихода помехи. Вектор сигналов микрофонов для этого случая запишем в следующем виде:

$$\mathbf{M}(f, k) = V(f, k) \mathbf{D}_V(f) = V(f, k) [e^{j\Phi_V}, e^{-j\Phi_V}]^T.$$

Тогда **корреляционная матрица** может быть записана в виде:

$$\mathbf{R}_{VV}(f) = P_V(f) \times \begin{bmatrix} 1 & e^{-j2\Phi_V} \\ e^{j2\Phi_V} & 1 \end{bmatrix},$$

где $P_V(f)$ – спектр мощности помехи.

Матрица $\mathbf{R}_{VV}(f)$ является вырожденной (определитель равен нулю), поэтому обратной матрицы не существует. Эту проблему можно решить, добавляя к диагональным элементам матрицы регуляризующую константу [11]. Однако, поскольку в формуле для оптимальных коэффициентов обратная матрица присутствует в знаменателе и числителе, можно воспользоваться формальным выражением для обратной матрицы:

$$\mathbf{R}_{VV}^{-1}(f) = \frac{1}{\Delta(f)} \begin{bmatrix} 1 & -e^{j2\Phi_V} \\ -e^{-j2\Phi_V} & 1 \end{bmatrix}.$$

Тогда вектор оптимальных коэффициентов для известного направления прихода целевого сигнала может быть записан в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_0(f) &= \mathbf{R}_{VV}^{-1}(f) \mathbf{D}_S(f) / (\mathbf{D}_S^H(f) \mathbf{R}_{VV}^{-1}(f) \mathbf{D}_S(f)) = \\ &= [e^{j\Phi_S} - e^{-j(\Phi_S - 2\Phi_V)}, e^{-j\Phi_S} - e^{j(\Phi_S - 2\Phi_V)}]^T / 4 \sin^2(\Phi_S - \Phi_V). \end{aligned}$$

Можно показать, что МР имеет следующий пространственный отклик:

$$B(f, \theta_x) = \left| \frac{\cos(\Phi_x - \Phi_S) - \cos(\Phi_x + \Phi_S - 2\Phi_V)}{2 \sin^2(\Phi_S - \Phi_V)} \right| =$$

$$= \left| \frac{\sin(\Phi_x - \Phi_V)}{\sin(\Phi_S - \Phi_V)} \right|.$$

Таким образом, пространственный отклик для алгоритма 5 совпадает с пространственным откликом алгоритма 2. Сформированный пространственный отклик сохраняет сигнал с целевого направления и формирует ноль в направлении помехи: $B(\theta_V, f) = 0$, $B(\theta_S, f) = 1$.

Отметим еще одно интересное свойство алгорит-

Таблица 1. Свойства алгоритмов обработки

Алгоритмы	Достоинства	Ограничения
Алгоритм 1	Одновременно могут быть подавлены когерентные помехи с разных направлений. Информация о положении источника помехи не используется, источник может перемещаться.	Степень подавления помех ограничена диаграммой направленности (шириной главного лепестка и уровнем боковых лепестков). Степень подавления помех в диапазоне НЧ незначительная.
Алгоритм 2	Возможность полного подавления помехи в известном направлении и выделение целевого сигнала с известного направления.	Невозможность восстановления целевого сигнала на частотах, соответствующих нулевой амплитуде ДН. Сложность адаптивной реализации алгоритма. Возможны звуковые артефакты, вызванные чрезмерным усилением сигналов с некоторых направлений. Необходима информация о положении источников как сигнала, так и помехи.
Алгоритм 3	Целевой сигнал искажен только помехами, поступающими через боковые лепестки. Полное подавление помехи после ее компенсации. Возможность адаптивной реализации алгоритма.	Возможны звуковые артефакты, вызванные чрезмерным усилением помехи в ветви компенсации.
Алгоритм 4	Полное подавление помехи в известном направлении.	Ослабление и искажение целевого сигнала за исключением случая ортогональности направлений прихода целевого сигнала и помехи. Значительное подавление целевого сигнала при сближении направлений прихода сигнала и помехи. Увеличение подавления целевого сигнала в диапазоне низких частот.
Алгоритм 5	Полное подавление помехи с направления ее прихода и полное выделение целевого сигнала с известного направления. Возможность адаптивной реализации алгоритма.	Возможны звуковые артефакты, вызванные чрезмерным усилением сигналов с некоторых направлений.

ма 5. Если на микрофонах присутствуют только независимые шумы $R_{vv}(f) = \sigma_n^2 \mathbf{I}$, то оптимальные веса будут такими же, как у МР с алгоритмом 1:

$$W_o(f) = \mathbf{I}^{-1}(f) \mathbf{D}_s(f) / (\mathbf{D}_s^H(f) \mathbf{I}^{-1}(f) \mathbf{D}_s(f)) = \mathbf{D}_s(f) / (\mathbf{D}_s^H(f) \mathbf{D}_s(f)) = \mathbf{D}_s(f) / 2.$$

Свойства алгоритма.

– Оптимальные веса обеспечивают подавление помехи с заданного направления и единичный отклик МР в направлении источника целевого сигнала.

– Пространственный отклик для данного алгоритма совпадает с пространственным откликом алгоритма 2.

Сравнение алгоритмов

Результаты сравнения алгоритмов приведены в табл. 1.

Заключение

Рассмотрены алгоритмы выделения целевого сигнала с заданного направления в присутствии аддитивной когерентной помехи с известного направления. Проведенный анализ показывает, что с помощью подстройки комплексных весовых коэффициентов фильтров сигналов микрофонов обеспечивается выделение целевого сигнала и подавление помехи. Практическая обработка сигналов не может быть основана на столь подробной информации о расположении и характере источников сигналов. Другим ограничением является сценарий статичной обстановки (источники сигнала и помехи не могут перемещаться). Эти ограничения могут быть преодолены в адаптивных алгоритмах, когда информация о сигнале и помехе оценивается из поступающих на микрофоны сигналов. В основу адаптивных алгоритмов могут быть положены алгоритмы 3, 5. Представленные результаты могут быть полезны для разработки схем

обработки сигналов микрофонных решеток с большим числом микрофонов.

Литература

- Brandstein M. and Ward D. (Eds.). Microphone Arrays: Signal Processing Techniques and Applications. – Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2001.
- Benesty J. and Chen J. Study and Design of Differential Microphone Arrays. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- Benesty J. Chen J. Huang Y. Microphone Array Signal Processing. – Springer, 2008, 250 p.
- Монзинго Р.А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки. – М.: Радио и связь, 1986, 448 с.
- Fischer S., Kammeyer K., and Sinner K. Adaptive Microphone Arrays for Speech Enhancement in Coherent and Incoherent Noise Fields. Proc. 3rd meeting of the Acoustical Society of America and the Acoustical Society of Japan, 1996, pp.1-30.
- Buck M., et al. A Compact Microphone Array System with Spatial Post-Filtering Automotive Applications. Proc. ICASSP 2009, pp. 221-224.
- Li M. Advanced array processing techniques and systems // International Journal of Computer Research, 2009, v.17 (4). pp. 381-414.
- Кривошейкин А.В., Перелыгин С.В. Микрофонная решетка для реализации направленной акустической антенны // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 3. С. 221-225.
- Dillon H. Background noise – the problem and some solutions, National Acoustic Laboratories (NAL), CRC for Cochlear Implant and Hearing Aid Innovations.
- Gaokar R., Cheeran A. Performance analysis of beamforming algorithms // International Journal of Electronics and Communication Technology. 2011. V. 2. N 1. pp. 43–48.
- Lockwood M. et al. Performance of time- and frequency-domain binaural beamformers based on recorded signals from real rooms. J. Acoust. Soc. Am. 115 (1), January 2004, pp.379-391.