

Погрешность определения угла местоположения источника звука микрофонной системой с алгоритмом пространственно-временной обработки сигнала

А.В Мокрецов

Технологический "Институт Южного Федерального Университета" в г.Таганроге.

В настоящее время широкое распространение получила пространственно-временная обработка сигналов во многих областях науки и техники. Ее использование позволило достичь существенного повышения эффективности телекоммуникационных и локационных систем [1]. Одним из направлений применения такой обработки являются системы обработки и преобразования акустических сигналов на основе набора (решетки) микрофонов, разнесенных в пространстве и обеспечивающих формирование характеристик направленности (ХН), а также управление на основе совместной обработки сигналов на их выходах. На основе таких алгоритмов также могут строиться системы определения местоположения (локализации) источника звука (ИЗ) в пространстве. В этом случае информация о положении ИЗ может содержаться в весовых коэффициентах, полученных на основе применяемых алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов [1 – 3].

Задачи локализации ИЗ также решаются за счет систем под названием TDOA (Time-Difference-Of-Arrival - разность времени прихода сигнала). В большинстве случаев они состоят из двух ненаправленных микрофонных капсулей (приемников давления), разнесенных на расстоянии около 100 мм друг от друга. Локализация ИЗ в таких системах осуществляется путем измерения времени задержки прихода сигнала одного приемника давления относительно другого и имеет множество алгоритмов [4]. Несмотря на большое распространение таких методов, в литературе основным направлением развития является уменьшение влияния отражений звуковых волн в помещении на работу системы. При этом точностным характеристикам локализации источника звука, которые в отсутствие внешних шумов и отражений в помещении (для систем TDOA) могут достигать $\pm 12^\circ$, уделяется небольшое внимание. Тем не менее, как для адаптивных систем [2], так и систем TDOA, точностные характеристики локализации ИЗ являются одними из основных и могут быть основополагающими при выборе алгоритмов.

В работе [5] предложена микрофонная система с адаптивным управлением ХН, её структура показана на рис. 1. Она состоит из двух двунаправленных микрофонов М1 и М2, размещенных в одной точке пространства, а также процессора (ВП) предназначенного для расчета весовых коэффициентов. ХН микрофонов такой системы располагаются перпендикулярно друг другу. Для изменения положения двунаправленной («восьмерки») ХН выполняется весовая обработка сигналов с выходов двух микрофонов, после чего производится их сложение. Положение ХН при этом определяется значениями весовых коэффициентов V_1, V_2 .

Целью работы является экспериментальное исследование погрешности локализации одного ИЗ в условиях отсутствия внешних шумов и отражений сигнала источника.

Адаптивный алгоритм управления ХН, предложенный в работе [5], основан на пространственно-временной обработке сигналов с выходов двух направленных микрофонов. Расчет угла положения ИЗ выполняется на основе характеристического уравнения собственных значений корреляционной матрицы

$$\mathbf{O}^T \mathbf{R} \mathbf{O} = \mathbf{\Lambda}, \quad (1)$$

где \mathbf{O} – матрица собственных векторов, \mathbf{R} - корреляционная матрица входного сигнала, $\mathbf{\Lambda}$ – диагональная матрица собственных значений корреляционной матрицы \mathbf{R} ,

внедиагональные элементы которой равны нулю. Для решения уравнения (1) необходимо найти собственные значения γ корреляционной матрицы \mathbf{R} , которые находятся из характеристического уравнения второго порядка

$$\det[\mathbf{R} - \gamma\mathbf{I}] = 0.$$

Здесь \mathbf{I} – единичная матрица с нулевыми внедиагональными элементами, $\mathbf{0}$ – матрица с нулевыми элементами. Подставляя в выражение (1) полученные значения γ и, решая это уравнение, находят матрицу собственных векторов \mathbf{O} . Информация о положении ИЗ содержится в первом столбце матрицы \mathbf{O} . Угол положения ИЗ находится из выражения $\alpha = \arccos(V_1)$ или $\alpha = \arcsin(V_2)$, где V_1 и V_2 – верхний и нижний соответственно элемент (весовой коэффициент) первого столбца матрицы \mathbf{O} .

Экспериментальное исследование погрешности локализации ИЗ проводилось в математическом пакете MathCAD. Для этого сформирован дискретный случайный процесс $X(j)$ с нормальным законом распределения, дисперсией $1B^2$ и нулевым математическим ожиданием. Характеристика направленности для предложенной структуры (см. рис.1) описывается функциями $D1(\theta) = \cos(\theta)$ и $D2(\theta) = \sin(\theta)$, где $D1(\theta)$ – ХН капсуля М1, $D2(\theta)$ – ХН капсуля М2, θ – угол прихода сигнала ИЗ. Отсюда, для заданного угла θ сигналы на выходах М1 и М2 можно описать функциями

$$X_{M1}(j) = D1(\theta)X(j), \quad (2)$$

$$X_{M2}(j) = D2(\theta)X(j). \quad (3)$$

По предложенному алгоритму [4] рассчитываются статистические характеристики процессов $X_{M1}(j)$, $X_{M2}(j)$ и вычисляется угол α .

Погрешность определения угла положения ИЗ (угла α) может зависеть от таких факторов как собственный шум микрофонной системы или уровня входного сигнала микрофонов, определяющие отношение сигнал/шум. Эти факторы определяются конструкцией и выбором элементной базы при построении микрофонной системы, поэтому в рамках этой работы исследована погрешность, вызванная неравномерностью частотной характеристикой чувствительности (ЧХЧ) микрофонной системы или отклонением чувствительностей микрофонов М1 и М2. Такая неравномерность может быть вызвана собственной неравномерностью ЧХЧ каждого микрофона, а также разбросом чувствительностей направленных микрофонов. Оценка абсолютной погрешности производилась для фиксированных значений θ в диапазоне углов 360° и шагом 15° по выражению

$$\Delta = \alpha_2 - \alpha,$$

где α – угол полученный путем подстановки выражений (2) и (3) в уравнение (1), α_2 – угол полученный путем замены (2) на

$$X_{M1}(j) = D1(\theta)X(j)\Delta S,$$

где ΔS описывает изменение чувствительности микрофона М1. На рис. 2 показана зависимость абсолютной погрешности Δ от угла прихода сигнала ИЗ θ для $\Delta S = 1$ дБ (сплошная линия), $\Delta S = 2$ дБ (пунктирная линия) и $\Delta S = 2,5$ дБ (штриховая линия). Из анализа рисунка следует, что абсолютная погрешность зависит от отклонения чувствительностей капсулей М1 и М2, а также от угла θ . Максимальная погрешность характерна для углов $\theta = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$, которая для $\Delta S = 1$ дБ не превышает $\pm 3,3^\circ$, для $\Delta S = 2$ дБ – $\pm 6,5^\circ$, для $\Delta S = 2,5$ дБ – $\pm 8,1^\circ$. Минимальное значение абсолютной погрешности, близкое к нулю, соответствует углам $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$.

Выражения (2) и (3) описывают идеальные ХН микрофонной системы. Для двунаправленных микрофонов минимальная чувствительность ХН определяется

значением параметра глубины нуля. Для большинства микрофонов это значение составляет от 14 дБ до 26 дБ и зависит как от группы сложности микрофона, так и от частоты на которой получена ХН [6]. Учитывая это, для значений углов $\theta = 0^0, 180^0$ выражение (3) записывается в виде

$$X_{M2}(j) = 10^{\frac{-S}{20}} X(j), \quad (4)$$

где S – значение глубины нуля ХН. Для углов $\theta = 90^0, 270^0$ функция (2) заменяется выражением (4). Путем подстановки этих выражений в (2) и (3), для четырех значений углов θ произведен анализ влияния значения глубины нуля ХН на погрешность определения угла местоположения ИЗ. Из него следует, что уменьшение значения глубины нуля для углов $\theta = 0^0, 90^0, 180^0, 270^0$ приводит к увеличению абсолютной погрешности. Так, для значения глубины нуля 30 дБ погрешность не превышает $\pm 2^0$, при 20 дБ – $\pm 6^0$, при 14 дБ – $\pm 12^0$. Таким образом, погрешность также зависит от изменения формы ХН, что накладывает дополнительные требования в подборе направленных микрофонов М1 и М2.

В работе исследована погрешность определения угла положения ИЗ микрофонной системы с адаптивным алгоритмом управления ХН. В результате экспериментального исследования в математическом пакете MathCAD, получены зависимости погрешности определения угла положения ИЗ от угла прихода сигнала ИЗ. Из анализа этих зависимостей следует, что увеличение разности чувствительностей двух направленных микрофонов приводит к увеличению погрешности, максимальное значение которой характерно для углов прихода сигнала ИЗ $45^0, 135^0, 225^0, 315^0$. Таким образом, для погрешности $\pm 6,5^0$ разность чувствительностей не должна превышать 2 дБ. В случае идеальной микрофонной системы, для которой значение (в децибелах) глубины нуля ХН стремится к бесконечности, для углов $\theta = 0^0, 90^0, 180^0, 270^0$ погрешность минимальна и близка к нулю. С уменьшением значения глубины нуля ХН, для этих углов, происходит увеличение погрешности, которая достигает $\pm 12^0$ при значении глубины нуля ХН 14 дБ. С увеличением этого параметра погрешность уменьшается. Таким образом, для снижения погрешности, при построении предложенной микрофонной системы с адаптивным управлением ХН, необходимо тщательно подбирать по чувствительности пары направленных микрофонов ХН которых имеет стабильные параметры в рабочем диапазоне частот.

Литература

1. Федосов В.П., Кравченко Г.В. Адаптивная антенная решётка с автоматическим сканированием в приповерхностном отражающем слое. // Антенны, 2001, № 4(50). – С. 42-45.
2. Кириченко И.А., Старченко И.Б. Принцип адаптивного подхода к управлению характеристиками акустических систем. // Инженерный вестник Дона.2011.№4.
3. Муравьев И.В., Перцев Л.В., Исаенков Н.С. Обзор методов адаптивного использования спектра // Инженерный вестник Дона.2011.№3.
4. Benesty J., Chen J., Huang Y., *Microphone Array Signal Processing*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2008. – 245 pp..
5. Мокрецов А.В. Двухнаправленный микрофон с адаптивной характеристикой направленности. //Телекоммуникации. В печати.
6. А.П. Ефимов, А.В. Никонов, М.А. Сапожников, В.И. Шоров Акустика: Справочник. Под ред. М.А.Сапожкова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 1989. - 336 с.