

СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.056.53

А.Н. ОЛЕЙНИКОВ, канд. техн наук, А.В. БОРОДАВКА

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СРЕДСТВ АКУСТИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

Введение

В настоящее время самым распространенным средством ведения акустической разведки (дистанционного несанкционированного съема акустической информации) являются узконаправленные микрофоны, выполненные в виде единичных акустических приемников или в виде микрофонных решеток (МР). К средствам дистанционного съема акустической информации можно отнести также лазерную систему акустической разведки, которая в данной статье не рассматривается [1 – 2].

Развитие и совершенствование узконаправленных микрофонов условно можно разделить на три этапа: «акусто-механический» этап, этап аналоговой обработки аудиосигналов и этап цифровой обработки аудиосигналов в средствах дистанционного съема информации [2].

Первые средства акустической разведки, представлявшие собой громоздкие акусто-механические системы, были разработаны в начале XX в. и применялись для обнаружения летательных аппаратов и определения положения артиллерийских батарей, уступив место средствам радиолокации перед Второй мировой войной [2].

Узконаправленные микрофоны с аналоговой обработкой аудиосигналов можно отнести ко второму этапу их развития. Микрофоны этой группы разделяют на: комбинированные, рефлекторные и групповые, включающие в себя линейную группу микрофонов, плоскую решетку микрофонов и трубчатые микрофоны [1 – 2].

Основные сравнительные характеристики и параметры этих узконаправленных микрофонов (УНМ) представлены в [1] и сведены в таблицу, в которой приведены формулы для расчета характеристик направленности $R(\theta)$ микрофонов, значение их индекса направленности (Q) при одинаковых габаритных размерах акустических систем. Параметры УНМ сильно зависят от отношения их габаритных размеров к длине звуковой волны и, как правило, имеют невысокие значения пространственной избирательности на низких частотах. В области высоких частот наилучшей пространственной избирательностью обладает рефлекторный микрофон, который не имеет ограничения по максимально применимой рабочей частоте (F_{max}). На низкой частоте индекс направленности УНМ типа линейной группы микрофонов несколько превышает индекс направленности рефлекторного микрофона, но его значения невысоки (единицы дБ) [1].

В это же время на основе антенных решеток были разработаны первые аналоговые МР с простейшей обработкой электрических сигналов единичных микрофонов решетки [2].

Развитие и совершенствование узконаправленных микрофонов с цифровой обработкой сигналов (ЦОС)

Третьим этапом развития и совершенствования узконаправленных микрофонов (начиная с 90-х годов XX в.) стало использование средств цифровой обработки аудиосигналов в микрофонных решетках [2].

С развитием ЦОС МР стали применяться для решения широкого круга задач, связанных с обработкой речевых сигналов: выделение речи целевого источника в шумах (повышение разборчивости); дистанционное распознавание речи (например, для голосового управления устройствами; определение и трассировка положения источников звука; системы автоматического распознавания речи и речевого управления; слуховые аппараты и др.

Сравнительные характеристики узконаправленных микрофонов (УНМ)

Тип узконаправленного микрофона (УНМ)	Формула для расчета характеристики направленности $R(\theta)$	1. Параметры УНМ 2. Значение индекса направленности Q	Обобщающая характеристика УНМ
Комбинированные микрофоны	$R(\theta) = 1 - C + C \times \cos(\theta)$ <p>где $C = \frac{E_{\text{доо}}}{(E_o + E_{\text{доо}})}$</p>	C=1 Q=4,8 дБ C=0,75 Q=6 дБ C=0,63 Q=5,7 дБ C=0,5 Q=4,8 дБ C=0 Q=0 дБ	Низкое значение пространственной избирательности: $Q_{\text{max}} = 6$ дБ
Трубчатые микрофоны	$R(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{n \times \pi \times d}{\lambda} \times (1 - \cos(\theta))\right)}{n \times \sin\left(\frac{\pi \times d}{\lambda} \times (1 - \cos(\theta))\right)}$ <p>n – число трубок, d – расстояние приращения трубок, L – длина наибольшей трубки</p>	при $L = 90$ см, $n = 33$, $d = 2,8$ см. Q= 16 дБ на частоте 4 кГц	При одинаковых габаритных размерах уступает линейной группе по всем параметрам; ограничение по $F_{\text{max}} \leq \frac{c}{2d}$
Линейная группа микрофонов	$R(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{n \times \pi \times d}{\lambda} \times \sin(\theta)\right)}{n \times \sin\left(\frac{\pi \times d}{\lambda} \times \sin(\theta)\right)}$ <p>n – число микрофонов, d – расстояние между микрофонами, L – общая длина МР</p>	при $L = 90$ см, $n = 21$, $d = 4,3$ см Q= 25дБ на частоте 4 кГц	Индекс направленности Q на высокой частоте ниже, чем у рефлекторного УНМ; ограничение по $F_{\text{max}} \leq 1,5 \frac{c}{2d}$; возможность применения ЦОС
Рефлекторные микрофоны	$R(\theta) = \frac{2 \times J_1(\psi)}{\psi}$ <p>где $\psi = \frac{2 \times \pi}{\lambda} \times \rho_0 \times \sin(\theta)$ ρ_0 – диаметр параболы отражателя, $J_1(\psi)$ – функция Бесселя 1-го порядка</p>	$d = 90$ см. Q = 30 дБ на частоте 4 кГц	Обладает наилучшей пространственной избирательностью на высокой частоте, но на низкой частоте уступает УНМ типа линейной группе микрофонов; ограничения по F_{max} не имеет

Мощным дополнительным импульсом к расширению сферы применения МР стали разработка и серийный выпуск цифровых микроэлектромеханических систем МЭМС микрофонов (в английской транскрипции MEMS – Microelectromechanical systems). МЭМС микрофоны преобразуют аналоговый сигнал в цифровой, позволяя использовать ЦОС, что повышает качество МР и стабильность ее характеристик. Малые размеры микрофонов дают возможность при необходимости повысить максимально применимую рабочую частоту решетки.

Все технологии извлечения речевой информации в МР неразрывно связаны с алгоритмами ЦОС, которые значительно расширяют функциональные возможности узконаправленных микрофонов. В МР наиболее часто используются следующие алгоритмы ЦОС: алгоритм задержки и суммирования (может использоваться самостоятельно или в подрешетках), алгоритм сверхнаправленности, алгоритм подавления боковых лепестков, алгоритм постфильтрации Винера [2, 4].

Структурная схема МР, использующая алгоритм задержки и суммирования, представляет собой линейную эквидистантную группу микрофонов, выходы которых соединены с сумматором через элементы, осуществляющие задержку сигналов на время, необходимое для

совмещения сигналов по фазе от всех микрофонов решетки. Этот алгоритм также позволяет осуществить качание луча МР за счет изменения фазового распределения вдоль раскрыва решетки. Большим недостатком таких решеток является их узкополосность, что приводит к сильной зависимости от частоты таких параметров МР, как ширина главного лепестка диаграммы направленности и уровень боковых лепестков.

Для устранения этой частотной зависимости и получения малой вариации величины пространственной избирательности в широком диапазоне частот используют подрешетки с одинаковым количеством микрофонов в каждой подрешетке, но с различными расстояниями между ними. Для каждого частотного участка используется решетка, которая удовлетворяет заданным параметрам по ширине главного лепестка и уровню боковых лепестков. На рис. 1 изображена структурная схема МР, реализующей данный алгоритм с применением полосовых фильтров (ПФ1-ПФ4) для каждого частотного диапазона. Как видно из рисунка, микрофоны используются сразу в нескольких подрешетках, что увеличивает их эффективность [4].

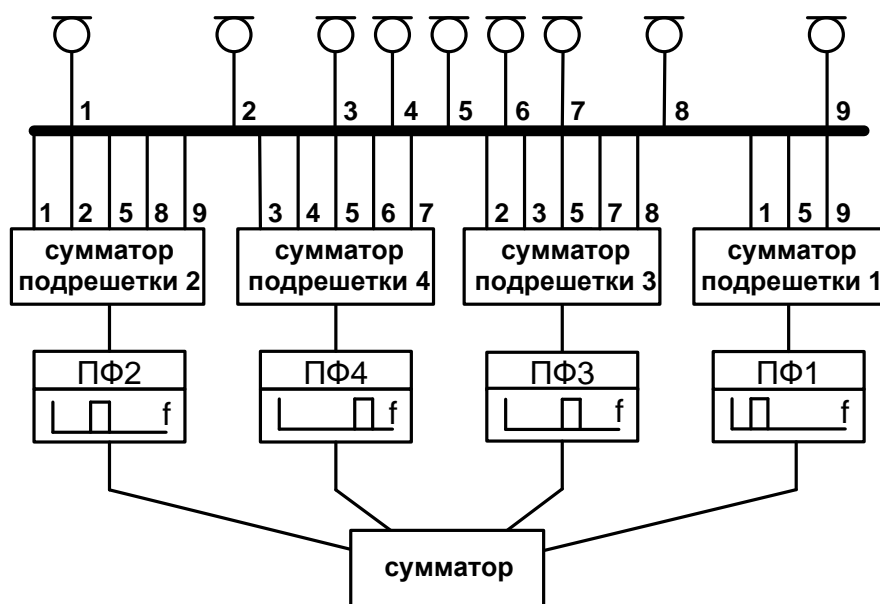


Рис. 1. Структурная схема МР, использующая алгоритм задержки и суммирования в подрешетках

МР, использующая алгоритм сверхнаправленности, имеет структуру, объединяющую в себе дифференциальную микрофонную решетку и МР на основе алгоритма задержки и суммирования.

Дифференциальная микрофонная решетка состоит из двух ненаправленных микрофонов, разнесенных на расстояние d . Сигнал со второго микрофона задерживается и вычитается из сигнала первого микрофона (рис. 2). Посредством вариации величины задержки τ можно изменять диаграмму направленности микрофонной решетки [3].

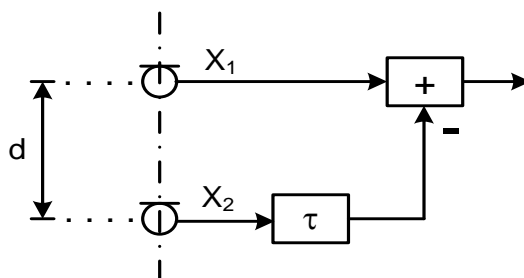


Рис. 2 Структурная схема дифференциальной микрофонной решетки

Недостатком дифференциальной микрофонной решетки является спад ее индекса направленности с увеличением частоты. По индексу направленности дифференциальная микрофонная решетка на более высоких частотах уступает МР, построенной по алгоритму задержки и суммирования. Оптимальной структурой микрофонной решетки для получения максимального индекса направленности является алгоритм сверхнаправленности. Алгоритм сверхнаправленности объединяет преимущества двух алгоритмов дифференциального и задержки и суммирования. На низких частотах используется более эффективный дифференциальный алгоритм $DIF(\omega)$, а на более высокой частоте – алгоритм задержки и суммирования $Q(\omega)$ (рис. 3).

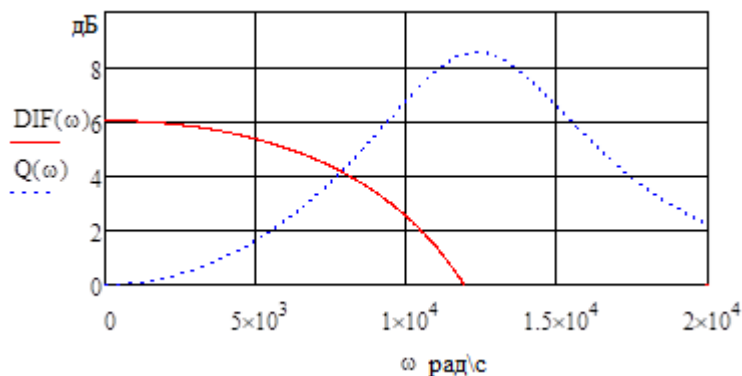


Рис. 3. Частотная зависимость индекса направленности дифференциальной микрофонной решетки и МР с алгоритмом задержки и суммирования

Структурная схема, реализующая алгоритм сверхнаправленности, показана на рис. 4.

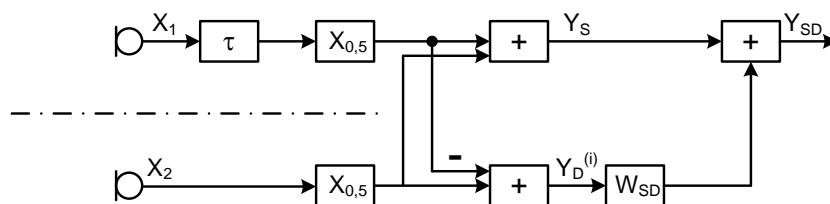


Рис. 4. Структурная схема сверхнаправленной решетки микрофонов (СНРМ)

Сигнал Y_S является суммой сигналов от двух микрофонов с задержкой. Сигнал $Y_D^{(i)}$ является разностью сигналов от двух микрофонов. Из формулы (1) можно получить диаграмму направленности алгоритма задержки и суммирования [3]:

$$HS(\omega, \theta) = \exp(-j \cdot k \cdot d \cdot 2) \times \cos(k \cdot d \cdot 2 \cdot (1 - \cos(\theta))) \quad (1)$$

Диаграмма направленности дифференциальной МР может быть рассчитана из следующей формулы [3]:

$$H_D^{(i)}(\omega, \theta) = j \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{k \cdot d}{2}\right) \times \sin\left(\frac{k \cdot d}{2} \cdot (1 - \cos(\theta))\right) \quad (2)$$

Для того чтобы получить оптимальный сигнал Y_{SD} , сигнал $Y_D^{(i)}$ должен пройти фильтр W_{SD} и затем быть вычтен из сигнала Y_S . Оптимальным фильтром будет решение Винера [3]:

$$W_{SD}(\omega) = \frac{-j \cdot \sin c(\omega \cdot \tau_a) \times \sin(\omega \cdot \tau_a)}{1 - \sin c(\omega \cdot \tau_a) \times \cos(\omega \cdot \tau_a)} \quad (3)$$

Зависимость индекса направленности от частоты можно рассчитать по формуле

$$DI_{SD}(\omega) = 2 \cdot \frac{1 - \sin c(2 \cdot \omega \cdot \tau_a)}{1 - \sin c^2(\omega \cdot \tau_a)} \quad (4)$$

Алгоритм сверхнаправленности позволяет получить максимум значения индекса направленности двух алгоритмов (рис. 5).

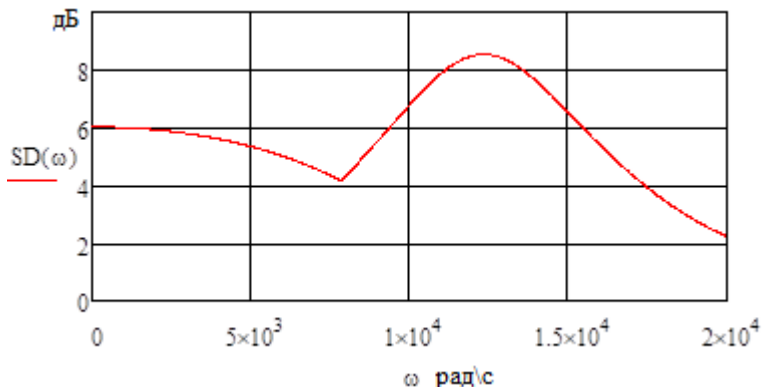


Рис. 5. Частотная зависимость индекса направленности МР с алгоритмом сверхнаправленности

Построение узконаправленной решетки с использованием подрешеток по алгоритму сверхнаправленности

Алгоритм сверхнаправленности применяется для решетки из двух микрофонов и поэтому невозможно достичь большого индекса направленности и большой рабочей полосы для МР при неизменных размерах всей решетки.

Если в линейной группе микрофонов использовать в качестве элемента группы МР, построенную по алгоритму сверхнаправленности (СНМР) (рис. 6), можно достичь существенного повышения индекса направленности в широкой полосе частот и особенно на низких частотах.

На рис. 7 изображены частотные зависимости индексов направленности двух линейных групп микрофонов:

- 1-я классическая МР с эквидистантным расположением микрофонов (LGM) с параметрами $d = 4.3$ см, $n = 21$, $L = 90$ см;
- 2-я МР с использованием в качестве элемента группы, двух микрофонов с ЦОС по алгоритму сверхнаправленности (СНМР) (по схеме на рис. 6) с теми же параметрами $d = 4.3$ см, $n = 21$, $L = 90$ см.

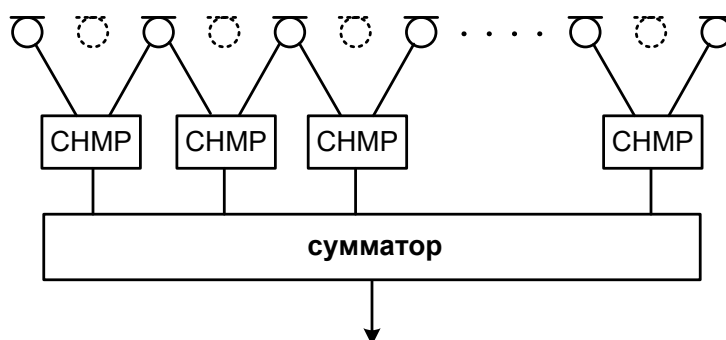


Рис. 6. МР в виде линейной группы микрофонов с использованием в качестве элемента группы, двух микрофонов с ЦОС по алгоритму сверхнаправленности (СНМР)

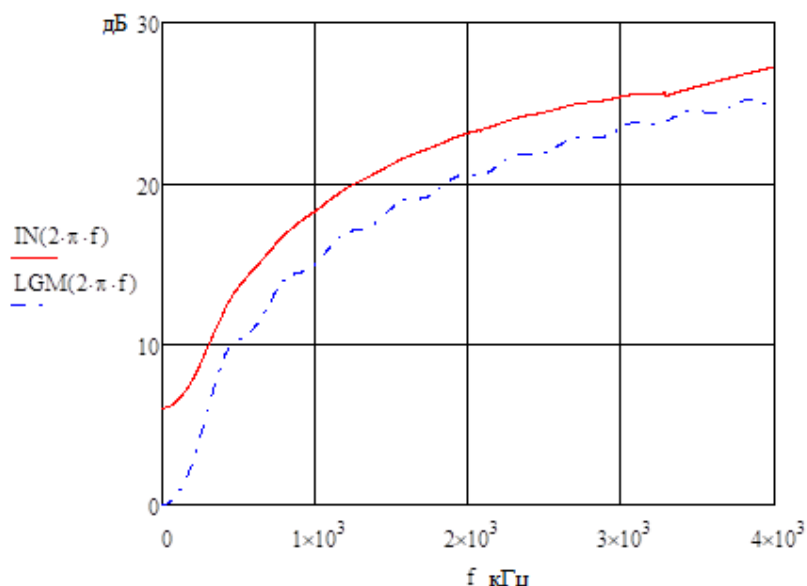


Рис. 7. Зависимость индекса направленности от частоты классической МР (LGM) и МР с ЦОС в подрешетках по алгоритму сверхнаправленности (IN)

Выводы

Средства акустической разведки развивались вместе с развитием технологий обработки сигналов. Большое влияние на развитие узконаправленных микрофонов оказала ЦОС. Использование решеток, применяющих алгоритм сверхнаправленности, позволяет поднять индекс направленности на низкой частоте, применяя их в качестве подрешеток в более сложных структурах МР. Полученное преимущество в 6 дБ позволяет получить увеличение дальности разведывательного контакта в два раза. Алгоритм подавления боковых лепестков, позволяет подавить мощную помеху, увеличивая отношение сигнал/шум. Алгоритм постфильтрации Винера позволяет компенсировать некогерентные помехи, а также снизить уровень помех от когерентных источников, принимаемых боковыми лепестками.

Список литературы: 1. Олейников, А.Н., Войтенко, А.О. Сравнительная характеристика параметров узконаправленных микрофонов // Радиотехника. – 2013. – Вып. № 173. – С. 224-231 2. Столбов, М.Б. Применение микрофонных решеток для дистанционного сбора речевой информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15. – No 4. – С. 661-675 3. Buck, M., Röβler, M. First order differential microphone arrays for automotive applications // Proc. 7th International Workshop on Acoustic Echo and Noise Control, IWAENC. Darmstadt, Germany, 2001, pp. 19 – 22 4. McCowan, I.A. Microphone Arrays: A Tutorial. Available at: <https://www.idiap.ch/~mccowan/arrays/tutorial.pdf> (accessed 01.04.2017).

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 17.03.2017