

А.Н. ОЛЕЙНИКОВ, канд. техн. наук, И.В. НОСУЛЬКО

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СРЕДСТВ АКУСТИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ ПРИ ИХ МАЛЫХ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРАХ

Введение

В связи с развитием технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) появляются качественные и малогабаритные микрофоны, использование которых в средствах акустической разведки позволяет улучшить их пространственную избирательность, не увеличивая их размеры. МЭМС-микрофоны могут непосредственно передавать цифровой сигнал, что открывает возможность цифровой обработки акустической информации.

В работе предложен вариант малогабаритной микрофонной решетки на базе МЭМС-микрофонов совместно с алгоритмами цифровой обработки сигналов, позволяющие сохранить пространственную избирательность средств акустической разведки при существенном уменьшении габаритных размеров.

Сравнительная характеристика типов узконаправленных микрофонов

До настоящего времени широко используются средства акустической разведки с аналоговой обработкой сигналов, к которым относятся:

- рефлекторный микрофон (РМ) – использующий параболический отражатель звуковой волны с однонаправленным микрофоном, расположенным в фокусе и ориентированный внутрь параболического отражателя;

- микрофон органного типа (МОТ) – состоящий из совокупности резонансных акустических систем, выполненных из набора трубок различной длины.

- микрофонная решетка (МР) – построенная на базе линейных групп с раскрывом L из n эквидистантных (на расстоянии d) микрофонов и общим сумматором. Диаграмма направленности такого типа акустического приемника формируется за счет суммирования сдвинутых по фазе сигналов единичных микрофонов, расположенных в узлах решетки.

Ограничение в линейных размерах средств акустической разведки вводится для возможности решения поставленных задач с учетом их специфики применения. Средство акустической разведки должно иметь в первую очередь высокую пространственную избирательность и ограниченные габаритные размеры.

На рис. 1 представлены для сравнения зависимости индекса направленности таких средств от частоты. Наиболее высокой пространственной избирательностью, за исключением частот ниже 200 Гц (рис. 1, б), обладает рефлекторный микрофон (табл. 1). Возможность применения цифровой обработки в такой системе ограничена из-за наличия всего одного акустического приемника. У микрофона органного типа наихудший из всех индекс направленности Q в диапазоне рабочих частот. Поставленным требованиям лучше всего отвечает плоская решетка микрофонов, благодаря конструктивным особенностям и возможности использования МЭМС-микрофонов совместно с цифровой обработкой сигналов.

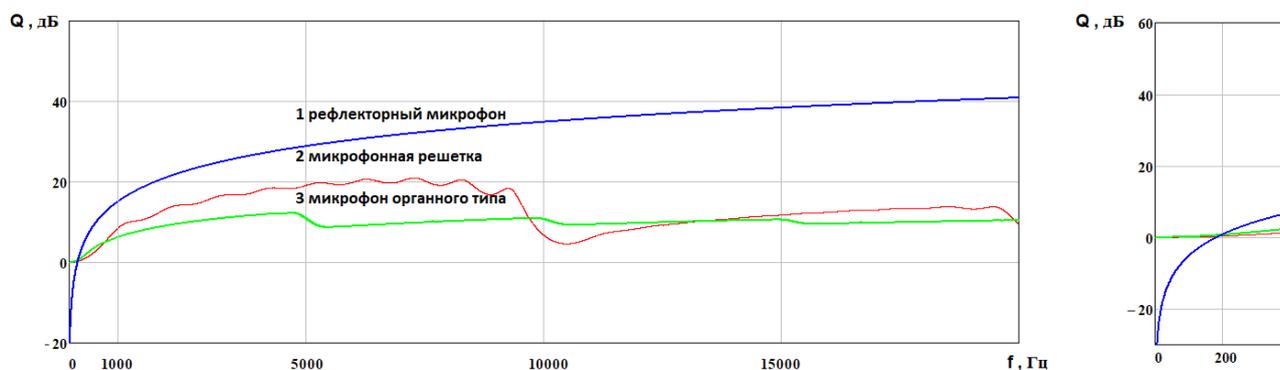


Рис. 1. Зависимость индекса направленности Q от частоты для направленных микрофонов при габаритных размерах $L = 0,3$ м и количестве микрофонов $n = 10$, 1 – РМ, 2 – МР, 3 – МОТ

Сравнение индексов направленности различных видов микрофонов при их габаритных размерах $L = 30, 60$ и 120 см

| Параметр | Микрофонная решетка ($n = 60$) | | | | Микрофон органного типа ($n = 60$) | | | | Рефлекторный микрофон | | | |
|------------------------|-------------------------------------|------|------|------|---|------|------|------|-----------------------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 4 | 8 | 1 | 2 | 4 | 8 | 1 | 2 | 4 | 8 |
| Q (дБ) $L = 30$ см | 7.2 | 12.2 | 17.4 | 23.1 | 5.7 | 8.7 | 11.6 | 14.6 | 11.7 | 18 | 23.9 | 29.9 |
| Q (дБ) $L = 60$ см | 12.2 | 17.4 | 23.1 | 29 | 8.7 | 11.6 | 14.6 | 17.6 | 18 | 23.9 | 29.9 | 35.4 |
| Q (дБ) $L = 120$ см | 17.4 | 23.1 | 29 | 33.2 | 11.6 | 14.6 | 17.6 | 20.5 | 23.9 | 29.9 | 35.4 | 44.7 |

Индекс направленности рассчитан по формуле

$$Q = 10 \cdot \lg \left(\frac{2}{\int_0^\pi R^2(\theta) \cdot \sin(\theta) d\theta} \right),$$

где $R(\theta)$ – характеристика направленности линейной группы микрофонов в микрофонной решетке:

$$R(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot d \cdot f \cdot \sin(\theta)}{c}\right)}{n \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot d \cdot f \cdot \sin(\theta)}{c}\right)},$$

где c – скорость звука, f – частота звукового колебания.

С целью повышения индекса направленности микрофонной решетки возможно использование в качестве единичных приемников – комбинированных микрофонов с суперкардиоидной ($R(\theta) = 0.37 + 0.63 \cdot \cos(\theta)$) или гиперкардиоидной ($R(\theta) = 0.25 + 0.75 \cdot \cos(\theta)$) характеристикой направленности. Это позволяет увеличить пространственную избирательность всей решетки на 5,72 дБ или 6 дБ соответственно (рис. 2, кривая 2).

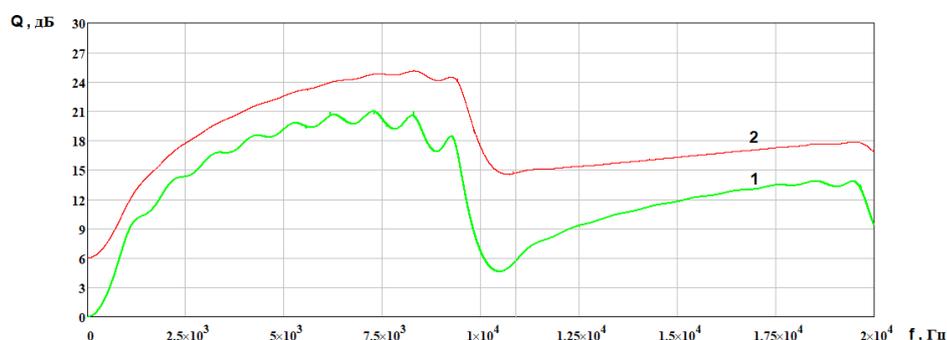


Рис. 2. Зависимости индекса направленности Q от частоты для МР с ненаправленными (1) и гиперкардиоидными (2) микрофонами, $L = 0,3$ м, $n = 10$

Влияние габаритных размеров и шага микрофонной решетки на ее пространственную избирательность и частотные характеристики

Основные параметры плоской микрофонной решетки – размер апертуры L и шаг между микрофонами d . Апертура решетки L влияет на значение индекса направленности – чем больше L , тем выше пространственная избирательность. Шаг решетки $d = L/(n-1)$ определяет максимально применимую рабочую частоту. Таким образом, от этих параметров напрямую зависят основные технические характеристики средства акустической разведки (табл. 2).

Ограничив максимальную рабочую частоту до 10 кГц, так как там содержится большая часть энергии речевой информации [2], вычислим нужный для этого шаг между микрофонами. Шаг равен $d = (1,5 \cdot c) / (2 \cdot F_{\max})$, таким образом, при значении $F_{\max} = 10$ кГц получим $d = 0,026$ м [3]. При ограничении апертуры $L = 0,3$ м количество микрофонов будет составлять $n = 12$.

Таблица 2

Значение индекса направленности МР на различных частотах при разных количествах микрофонов n с фиксированной апертурой $L = 0,3$ м

| n | Частота, кГц | | | | | | |
|----------------------|--------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | 0.25 | 0.5 | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 |
| 10 $d = 33$ мм | 0.568 | 2.281 | 8.224 | 13.09 | 17.845 | 19.6 | 12.461 |
| 20 $d = 16$ мм | 0.513 | 2.061 | 7.638 | 12.512 | 17.55 | 22.763 | 25.795 |
| 40 $d = 7,69$ мм | 0.488 | 1.96 | 7.345 | 12.221 | 17.414 | 23.12 | 28.089 |
| 60 $d = 5,08$ мм | 0.48 | 1.927 | 7.248 | 12.125 | 17.372 | 23.135 | 29.022 |
| 80 $d = 3,79$ мм | 0.476 | 1.911 | 7.199 | 12.078 | 17.352 | 23.125 | 28.958 |
| 100 $d = 3,03$ мм | 0.474 | 1.902 | 7.17 | 12.05 | 17.34 | 23.114 | 28.881 |

Использование цифровой обработки сигналов в микрофонных решетках

Можно использовать различные виды алгоритмов цифровой обработки сигналов [6 – 10], из которых наиболее приемлемые: дифференциальный алгоритм, алгоритм задержки и суммирования, алгоритм сверхнаправленности.

Частотная зависимость индекса направленности решетки с дифференциальным алгоритмом спадает по мере увеличения частоты и на верхних частотах уступает значению индекса направленности решетки с алгоритмом задержки и суммирования. Микрофонные решетки на базе алгоритма сверхнаправленности, который включает в себя совместное использование дифференциального алгоритма и алгоритма задержки и суммирования, являются наиболее оптимальной конструкцией.

Таким образом, на низких частотах улучшение индекса направленности происходит за счет дифференциального алгоритма, а с повышением частоты лучше работает алгоритм задержки и суммирования.

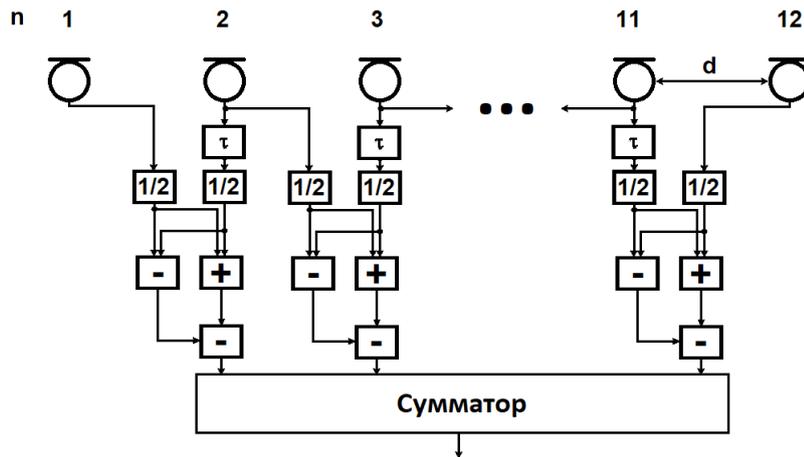


Рис. 3. Схема реализации алгоритма сверхнаправленности

Это позволяет получить максимум значения индекса направленности в диапазоне частот, который рассчитывается для этого случая по формуле [2]

$$Q(f) = 2 \cdot \frac{1 - \sin c(4 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau)}{1 - \sin c^2(2 \cdot \pi \cdot \tau)}$$

Применение микрофонов с характеристикой направленности в виде гиперкардиоиды совместно с алгоритмом сверхнаправленности позволяет решить две взаимосвязанные задачи.

Первая – увеличение пространственной избирательности системы при сохранении ее габаритных размеров. Частотная зависимость индексов направленности таких двух акустических приемников, с одинаковыми габаритными размерами ($L = 0,3$ м) представлено на рис. 4.

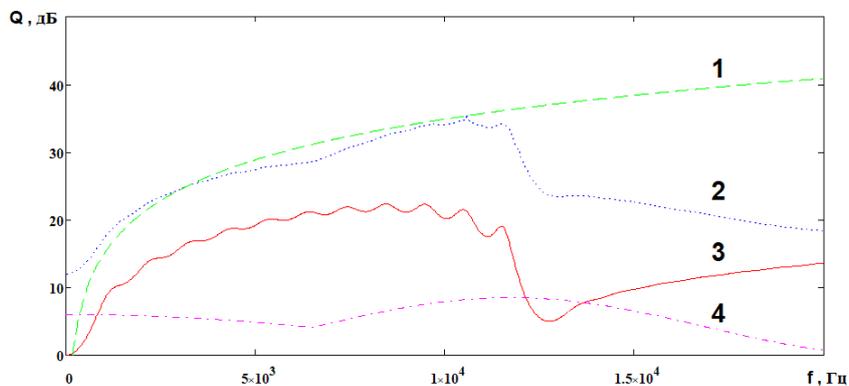


Рис. 4. Зависимость индекса направленности Q от частоты: 1 – рефлекторный микрофон, 2 – МР с использованием ЦОС, 3 – МР с ненаправленными микрофонами без ЦОС, 4 – алгоритм сверхнаправленности; $L = 0,3$ м, $n = 12$

Вторая – уменьшение габаритных размеров средств акустической разведки при сохранении пространственной избирательности того же уровня.

Для примера возьмем решетку из 12 микрофонов ($n = 12$) и апертурой в 30 см ($L = 0,3$ м), с граничной рабочей частотой 10 кГц

При соблюдении условия сохранения пространственной избирательности того же уровня максимальное уменьшение апертуры данной решетки с цифровой обработкой сигналов возможно вплоть до 10 см. При такой апертуре, шаг микрофонов равен 3,45 мм, который является практически граничным (типовые размеры МЭМС-микрофона 3,35 x 2,5 x 1 мм).

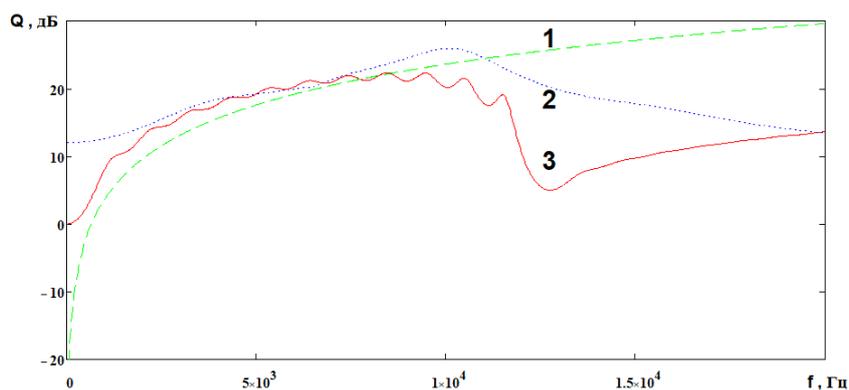


Рис. 5. Зависимость индекса направленности Q от частоты: 1 – рефлекторный микрофон ($L = 0,08$ м), 2 – сверхнаправленная МР ($L = 0,08$ м, $n = 4$), 3 – МР ($L = 0,3$ м, $n = 12$)

Выводы

Возможности систем акустической разведки на базе узконаправленных микрофонов определяются их геометрией и алгоритмами обработки принимаемых сигналов. Оптимизация геометрии микрофонных решеток приводит к конструкции, основная часть которой заключается в увеличении индекса направленности за счет возможностей цифровой обработки сигналов. Применение решетки микрофонов совместно с алгоритмами цифровой обработки сигналов позволяет сравнить индекс направленности рефлекторного микрофона и микрофонной решетки, а также существенно уменьшить габаритные размеры и количество микрофонов в конструкции при сохранении пространственной избирательности.

Список литературы:

1. Хорев А.А. Средства акустической разведки: направленные микрофоны и лазерные акустические системы разведки // Спецтехника и связь. 2008. № 3. С. 34 – 43.
2. Засоби та системи технічного захисту інформації: Навч. посібник для студентів УВО/ І.Є. Антіпов, А. М. Олейніков, Ю.В. Ликов, В.Д. Кукуш, І.О. Милютченко. Харків : ХНУРЕ, 2019. 216 с.
3. Олейников А.Н., Войтенко А.О. Сравнительная характеристика параметров узконаправленных микрофонов // Радиотехника. 2013. Вып. 173. С. 224 – 231.
4. Springer Handbook of Speech Processing / Eds. J. Benesty, M.M. Sondhi, Y. Huang. Springer, 2008. 1159 p.
5. Array Technology and Beamforming [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.head-acoustics.de/downloads/eng/head_visior/Array_Beamforming_07_09e.pdf, свободный (Яз. англ.)
6. McCowan I.A. Microphone Arrays: A Tutorial [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.idiap.ch/~mccowan/arrays/tutorial.pdf>, свободный. (Яз. англ.)
7. Gaokar R., Cheeran A. Performance analysis of beamforming algorithms // International Journal of Electronics and Communication Technology. 2011.
8. Singh H., Jha R.M. Trends in Adaptive Array Processing // International Journal of Antennas and Propagation. 2012. V. 2012.
9. Кривошейкин А.В., Перелыгин С.В. Микрофонная решетка для реализации направленной акустической антенны // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 3. С. 221 – 225.
10. Кривошейкин А.В., Перелыгин С.В. Моделирование микрофонной антенной решётки // Мир техники кино. 2015. №1 (35). С. 22 – 26.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 07.10.2019