

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПАРАМЕТРОВ УЗКОНАПРАВЛЕННЫХ МИКРОФОНОВ

Введение

Съем акустической информации при помощи узконаправленных микрофонов остается одним из наиболее распространенных способов ведения акустической разведки. Классификация узконаправленных микрофонов представлена на рис. 1. Наиболее часто используемыми типами направленных микрофонов в настоящее время являются линейная группа микрофонов, микрофон органного типа и рефлекторный микрофон.

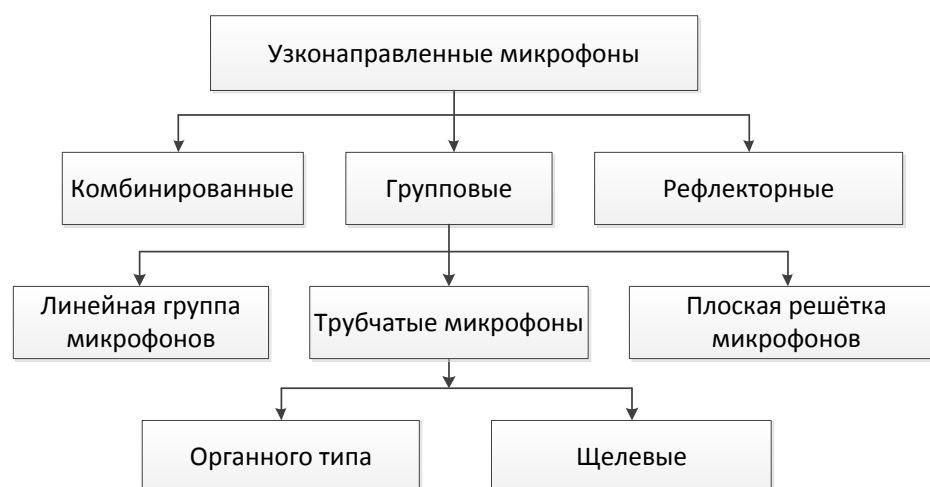


Рис. 1. Классификация узконаправленных микрофонов

В данной работе проводится обоснование выбора параметров узконаправленных микрофонов на основе исследования их характеристик и сравнительного анализа. Эффективность применения микрофонов оценивается путем расчета разборчивости речи, на которую влияют как энергетические характеристики сигнала, полученного на выходе средства акустической разведки, так и характер изменения индекса направленности микрофона (ИН) от частоты для речевого диапазона.

Методика анализа характеристик микрофонов

Одной из основных характеристик технических средств акустической разведки (на базе узконаправленных микрофонов) является дальность разведывательного контакта R применительно к конкретным условиям их использования. В случае открытого пространства, дальность разведывательного контакта и отношение сигнал/шум q на входе акустического приемника связаны соотношением [1]:

$$q = B_p - B_{ш} - 20 \lg R + Q - B_n \quad (1)$$

B_p – уровень акустического сигнала от источника, $B_{ш}$ – уровень внешних акустических помех, Q – индекс направленности микрофона (ИН), B_n – пороговая акустическая чувствительность микрофона.

Эта формула требует знания конкретных условий акустической разведки. Но во многих случаях эти параметры являются неточными, поэтому удобнее пользоваться сравнительной оценкой дальности, по отношению к дальности приема речевой информации невооруженным ухом. В этом случае не требуется знание точных параметров условий съема акустической

информации. Сравним возможности направленных микрофонов с невооруженным органом слуха. Задача сводится к нахождению отношения $\frac{R}{R_0}$, где R – дальность разведывательного контакта с использованием технического средства разведки, R_0 – дальность разведывательного контакта невооруженным ухом.

Дальность разведывательного контакта с использованием микрофона и невооруженного уха человека определяется из соотношений:

$$R = 10^{\frac{B_p - B_{u\text{и}} - B_n - q + Q}{20}} \quad \text{и} \quad R_0 = 10^{\frac{B_p - B_{u\text{и}} - B_{nc} - q + Q_0}{20}} \quad (2)$$

соответственно, где B_{nc} – порог слышимости (равен 0 дБ), Q_0 – индекс направленности человеческого уха (обычно принимают равным 6 дБ).

Формула для относительной оценки дальности разведывательного контакта примет вид

$$\frac{R}{R_0} = 10^{\frac{B_{nc} - B_n + Q - Q_0}{20}} \quad (3)$$

Из приведенных выше соотношений видно, что, стремясь увеличить максимальную дальность разведывательного контакта, наиболее продуктивно увеличивать индекс направленности микрофона путем подбора его конструктивных параметров.

Можно выделить три конструктивных параметра выше указанных узконаправленных микрофонов [2]:

L – максимальный габаритный размер микрофона;

d – расстояние между микрофонами для линейной группы микрофонов или приращение длины трубок в трубчатом микрофоне органного типа;

n – количество микрофонов в линейной группе микрофонов или количество трубок в трубчатом микрофоне органного типа.

Индекс направленности микрофона при симметричной характеристике направленности может быть рассчитан формуле [1]:

$$Q = 10 * \lg \left(\frac{2}{\int_0^\pi R^2(\Theta) * \sin(\Theta) d\Theta} \right), \quad (4)$$

где Θ – угол между рабочей осью микрофона и направлением прихода звука, $R(\Theta)$ – характеристика направленности микрофона.

В табл. 1 приведены формулы для расчета характеристик направленности наиболее часто используемых типов узконаправленных микрофонов: трубчатого микрофона органного типа, линейной группы микрофонов (плоская решетка микрофонов) и рефлекторного (параболического) микрофона.

Таблица 1

№ п/п	Тип узконаправленного микрофона	Формула для расчета характеристики направленности узконаправленного микрофона
1	Линейная группа микрофонов (плоская решетка) [2]	$R(\Theta) = \frac{\sin\left(\frac{n * \pi * d}{\lambda} * \sin\Theta\right)}{n * \sin\left(\frac{\pi * d}{\lambda} * \sin\Theta\right)}$
2	Трубчатый микрофон органного типа [2]	$R(\Theta) = \frac{\sin\left(\frac{n * \pi * d}{\lambda} * (1 - \cos\Theta)\right)}{n * \sin\left(\frac{\pi * d}{\lambda} * (1 - \cos\Theta)\right)}$
3	Рефлекторный микрофон [3]	$R(\Theta) = \frac{2 * J_1(\psi)}{\psi}, \text{ где } \psi = \frac{2 * \pi}{\lambda} \rho_0 * \sin\Theta$

Для примера на рис. 2 представлены частотные зависимости индекса направленности линейной группы микрофонов. Из рис. 2 видно, что эта зависимости носит немонотонный характер и имеет резкие перепады, что ограничивает применение узконаправленных микрофонов по частоте. Это ограничение характеризуется параметром f_{\max} (максимальной рабочей частотой).

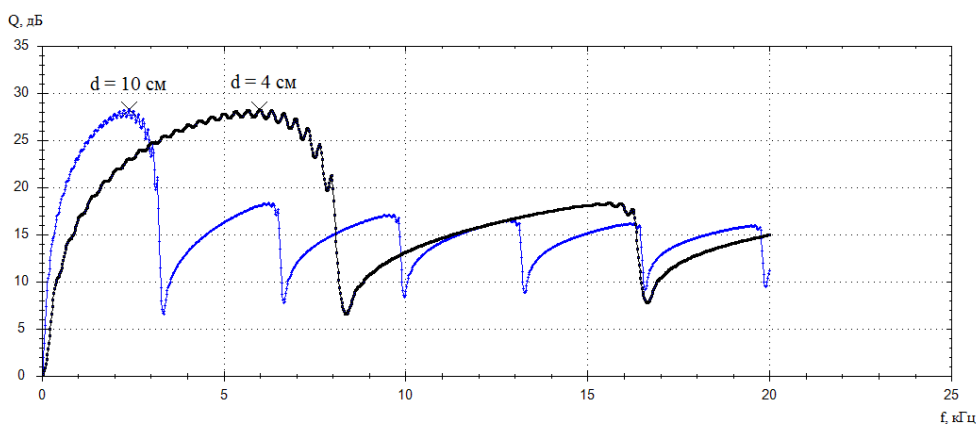


Рис. 2. Зависимость индекса направленности линейной группы микрофонов от частоты с параметрами $n = 25$, $d = 4$ и 10 см

Максимальная рабочая частота может быть найдена как глобальный максимум зависимости индекса направленности от частоты либо как значение частоты при изменении значения глобального максимума ИН в сторону увеличения на 10 %.

Анализ влияния значений параметров микрофонов на их характеристики

На рис. 3 представлены семейства зависимостей индекса направленности от частоты для различных параметров двух типов микрофонов (рис. 3, а,в,д) – линейная группа микрофонов, (рис. 3, б,г,е) – трубчатый микрофон органного типа.

Из рис. 3, а видно, что при постоянном значении параметра d ($d = 2,5$ см) для линейной группы микрофонов максимальная рабочая частота микрофона неизменна, а величина ИН растет с увеличением значения параметра n , причем при $n > 35$ прирост значения ИН становится не существенным и, в целом, имеет тенденцию к уменьшению.

Анализ характеристики микрофона органного типа показал те же свойства, однако замедление прироста значения ИН происходит при $n > 15 - 20$ (рис. 3, б).

В целом, характеристики линейной группы микрофонов лучше, как по максимальной рабочей частоте, так и по величине ИН по сравнению с микрофоном органного типа при одинаковых габаритных размерах.

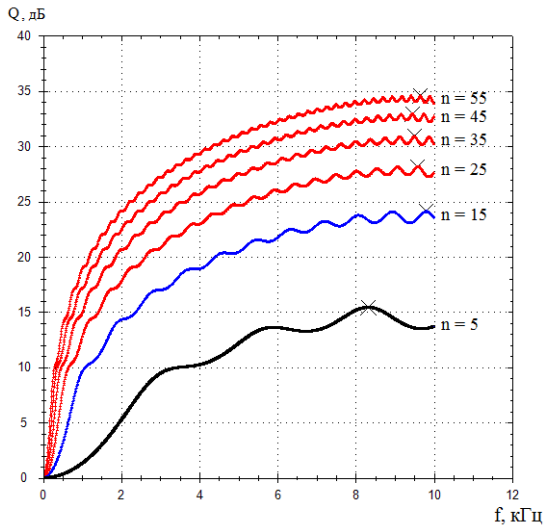
Для обоих типов микрофонов на максимальной рабочей частоте ИН практически не изменяется при постоянном количестве микрофонов (трубок) ($n = \text{const}$). При этом значение самой максимальной рабочей частоты изменяется. При $n = 60$ значение ИН для линейной группы микрофонов 35 дБ (рис. 3, в), а микрофона органного типа составило 20 дБ (рис. 3, г).

Для фиксированного значения размеров микрофона ($L = 1,2$ м) (рис. 3, д,е) изменялось расстояние между микрофонами (шаг приращения трубок) и количество микрофонов (трубок). При увеличении параметра n растет значение ИН, и уменьшается шаг приращения микрофона, что приводит к росту величины максимальной рабочей частоты. При уменьшении n и увеличении d показатели менялись противоположным образом – ИН уменьшался, и уменьшалось значение рабочей частоты.

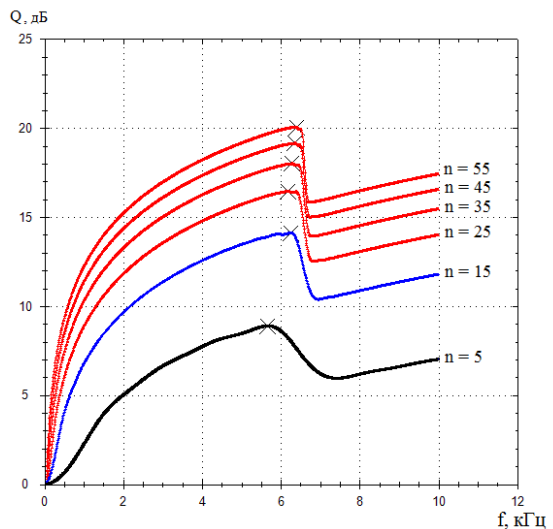
Анализ частотной зависимости ИН рефлекторного микрофона (рис. 4) позволяет сделать следующие выводы:

- индекс направленности рефлекторного микрофона имеет тенденцию увеличиваться с ростом частоты, что приводит к отсутствию ограничений по максимальной рабочей частоте;

$d = \text{const} = 25 \text{ мм}; n = \text{var}; L = (n-1)*d$

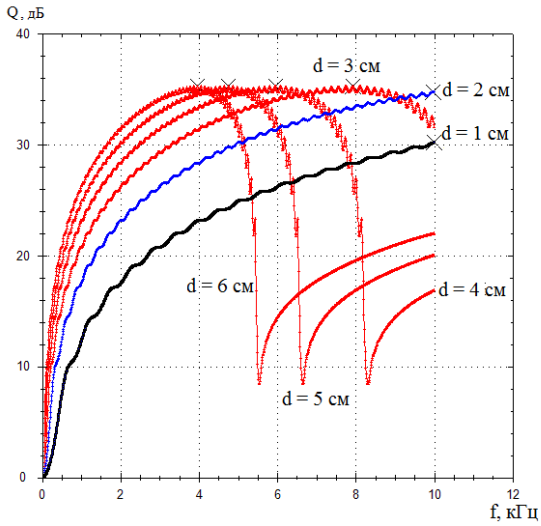


a

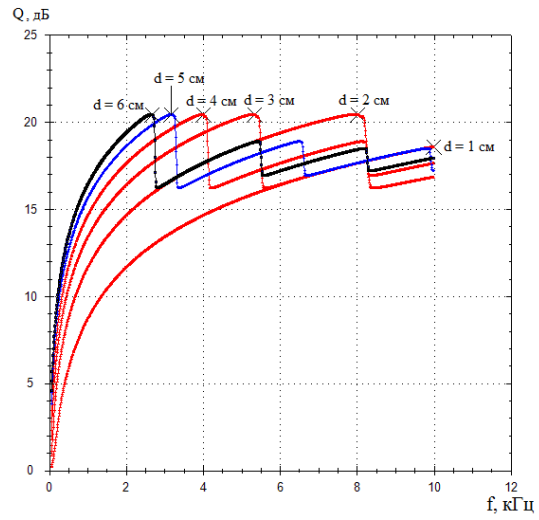


б

$n = \text{const} = 60; d = \text{var}; L = (n-1)*d$

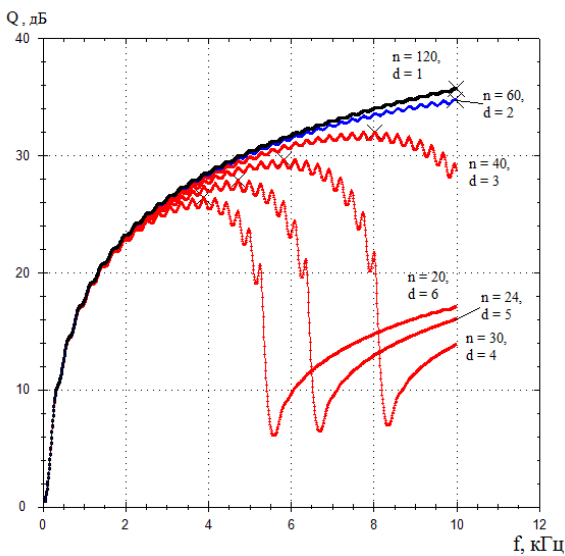


в

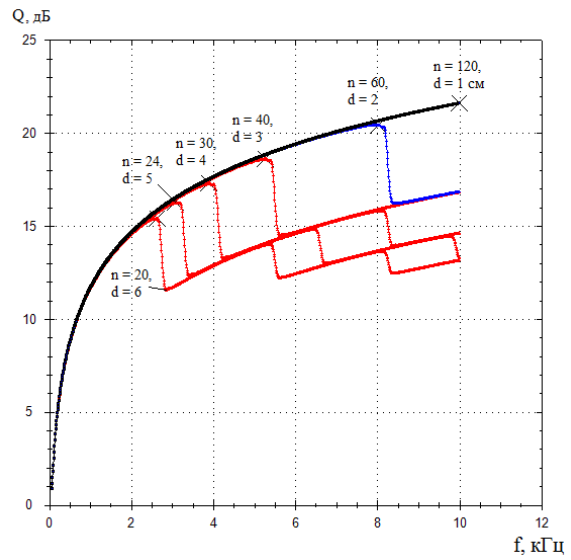


г

$L = \text{const} = 1200 \text{ мм}; d = \text{var}; d = L/(n-1); n = \text{var}; n = 1+L/d$



д



е

Рис. 3. Зависимости индекса направленности от частоты для различных параметров различных типов микрофонов

- рефлекторный микрофон имеет очень невысокий индекс направленности на низких частотах (до 1 кГц). В области низких частот градиент индекса направленности от частоты тем выше, чем больше диаметр параболоида.

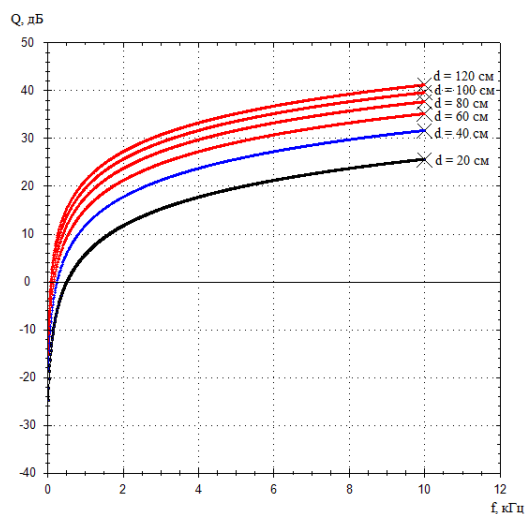


Рис. 4. Сравнение зависимостей ИН от частоты для различных значений параметра d параболоического микрофона

1) Наилучшими показателями при одинаковых габаритных размерах обладают следующие микрофоны в порядке убывания: рефлекторный, линейная группа микрофонов и трубчатый микрофон органного типа.

2) Линейная группа микрофонов и трубчатые микрофоны органного типа обладают лучшими параметрами в области низких частот.

Выбор параметров микрофонов для практического использования

С целью определить параметры микрофона, наилучшим образом пригодного для проведения акустической разведки, были заданы ограничения по геометрическим размерам микрофона – 1,2 м и максимальной рабочей частоте – 5,6 кГц, т.к. в полосе частот до 5,6 кГц содержится 95 % энергии речевого сигнала.

Анализ параметров узконаправленных микрофонов показывает, что ИН определяется габаритными размерами микрофонов. Факторами, ограничивающими габаритные размеры, являются:

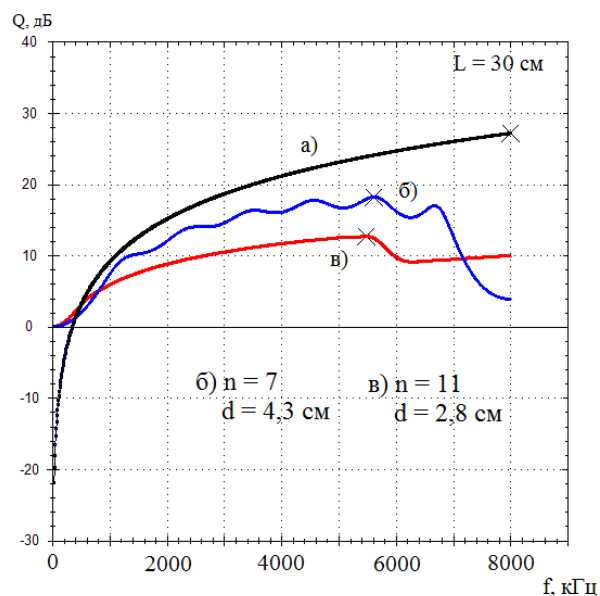
- ограничение размеров из-за удобства практического применения в реальных условиях;
- требование приближения формы фронта акустической волны к плоской, т.к. при длине группы, сравнимой с расстоянием приемника от источника звука, будут сказываться интерференционные явления из-за разности хода звуковых волн со сферическим фронтом от источника звука до отдельных микрофонов, входящих в состав группы [2].

Поэтому, задавшись габаритными размерами исходя из конкретных целей использования, по табл. 2 можно оценить реально достижимое значение ИН. На рис. 5 представлен набор семейств зависимостей ИН от частоты для рефлекторного микрофона (а), линейной группы микрофонов (б) и трубчатого микрофона органного типа (в), для четырех значений габаритных размеров акустических приемников.

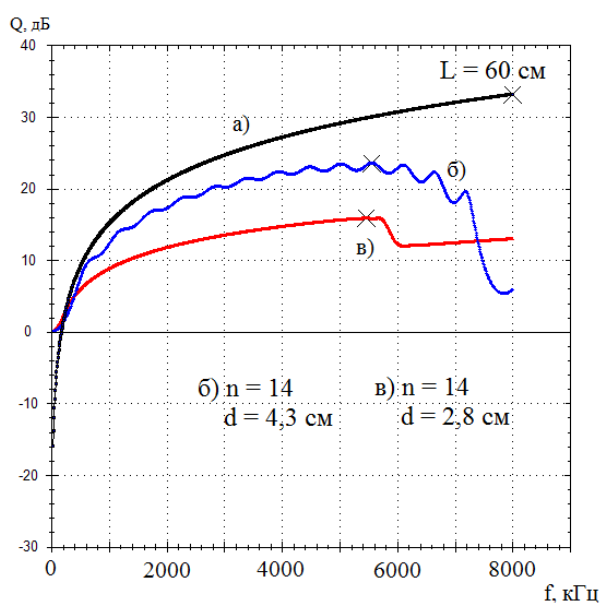
Дальнейший выбор параметров микрофонов определяется необходимой максимальной рабочей частотой, которая может ограничиваться частотой от 3400 до 8 кГц. Величина f_{\max} определяет параметр d , который рассчитывается по формулам (12), (13). Параметр n может быть найден отношением габаритного размера микрофона и параметра d :

$$n = \frac{L}{d} \quad (5)$$

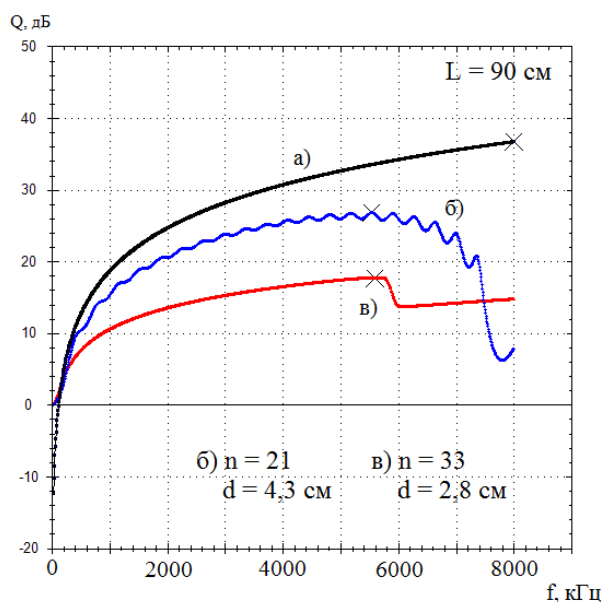
	$L = 30 \text{ см}$	$L = 60 \text{ см}$	$L = 90 \text{ см}$	$L = 120 \text{ см}$
Линейная группа микрофонов	18,2 дБ	23,5 дБ	26,8 дБ	29 дБ
Трубчатый микрофон органного типа	12,6 дБ	15,8 дБ	17,7 дБ	19 дБ
Рефлекторный микрофон	24 дБ	30 дБ	33,6 дБ	36,1 дБ



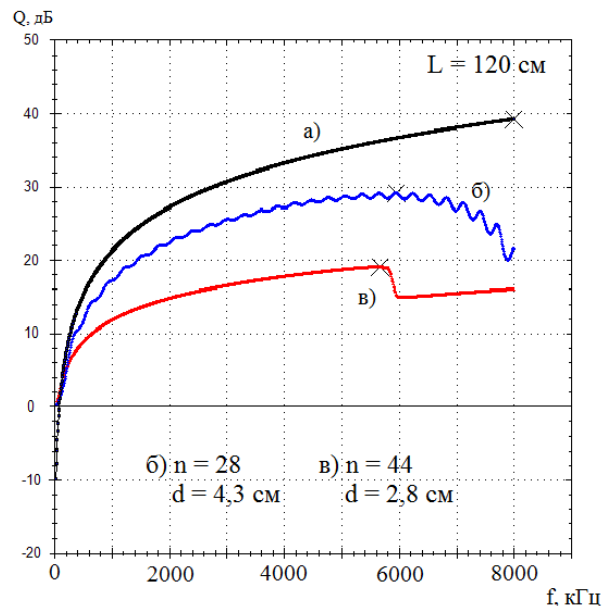
1



2



3



4

Рис. 5. Сравнение зависимостей индекса направленности от частоты для микрофонов с различными габаритными размерами: 30 см (1), 60 см (2), 90 см (3) и 120 см (4)

Для определения эффективности использования выбранного средства акустической разведки необходимо оценить разборчивость речи на выходе микрофона.

Анализ разборчивости речи может проводиться с использованием формантного метода [4]. Он заключается в разбиении всей анализируемой полосы частот на пять октавных полос.

Таблица 3

$f_0, Гц$	250	500	1000	2000	4000
$\Delta f, Гц$	180 – 355	355 – 710	710 – 1400	1400 – 2800	2800 – 5600

Первым шагом рассчитывается артикуляционная разборчивость, которая представляет собой сумму разборчивостей формант каждой полосы

$$A = \sum_{k=1}^K A_k = \sum_{k=1}^K p_k * P(E'_k), \quad (6)$$

где K – количество смежных полос, p_k – вероятность пребывания формант в k -й полосе частот; $P(E'_k)$ – коэффициент восприятия речи, иначе вероятность отсутствия маскировки речи шумом.

Вероятность пребывания формант в k -й полосе частот находится из разности

$$p_k = F_1(f_{вк}) - F_1(f_{нк}), \quad (7)$$

где $F_1(f_{нк})$ – функция распределения вероятностей формант, $f_{нк}$ – нижняя граничная частота полосы, $f_{вк}$ – верхняя граничная частота полосы.

Функция распределения вероятностей формант находится решением эмпирической формулы:

$$F(f) = \begin{cases} 2.57 * 10^{-8} * f^{2.4}, & 100 < f \leq 400 \text{ Гц} \\ 1 - 1.074 * \exp(-10^{-4} * f^{1.18}), & 400 < f \leq 10000 \text{ Гц} \end{cases} \quad (8)$$

Коэффициент восприятия речи рассчитывается по формуле

$$P(E'_k) = \begin{cases} \frac{0.78 + 5.46 * \exp[-4.3 * 10^{-3} * (27.3 - |E'_k|^2)]}{1 + 10^{0.1 * |E'_k|}}, & E'_k \leq 0 \\ 1 - \frac{0.78 + 5.46 * \exp[-4.3 * 10^{-3} * (27.3 - |E'_k|^2)]}{1 + 10^{0.1 * |E'_k|}}, & E'_k > 0 \end{cases}, \quad (9)$$

где $E'_k = E_k - \Delta B(f_{0k})$,

E'_k – эффективный уровень ощущения формант в полосе частот; E_k – эффективный уровень ощущения речевого сигнала в полосе частот, в данном исследовании принимается равным зависимости ИН микрофона от частоты; $\Delta B(f_{0k})$ – разница между усредненным спектром речи и спектром формант, которая определяется из формулы

$$\Delta B(f) = \begin{cases} \frac{200}{f^{0.48}} - 0.37, & f \leq 1000 \text{ Гц} \\ 1.37 + \frac{1000}{f^{0.69}}, & f > 1000 \text{ Гц} \end{cases} \quad (10)$$

Словесную разборчивость вычисляют с помощью формантной:

$$W = \begin{cases} 1.54 * A^{0.25} * [1 - \exp(-11 * A)], & A < 0.15 \\ 1 - \exp\left(\frac{11 * A}{1 + 0.7 * A}\right), & A \geq 0.15 \end{cases} \quad (11)$$

Различные оценки по коэффициенту словесной разборчивости приведены в табл. 4 – 6.

Таблица 4

Оценка разборчивости										
Неудовлетворительная				Приемлемая		Хорошая		Отличная		
0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица 5

Речевая коммуникация										
Отсутствует			Норм.		Хорошая		Отличная			
0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица 6

Секретность переговоров										
Надежная	Норм.	Неудовлетворительная			Отсутствует					
0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Результаты расчета разборчивости речи для микрофонов с реально достижимыми на практике параметрами (рис. 5), выбранными по описанной методике, не хуже 0,85-0,9.

Для проведения акустической разведки в целом и оценки разборчивости речи в частности важно правильно выбрать параметры микрофона, т.к. неправильные значения параметров приводят к резкому ухудшению коэффициента разборчивости речи. Например, трубчатый микрофон органного типа со значениями параметров $d = 3$ см, $n = 33$, $L = 99$ см и $f_{\max} = 5200$ Гц имеет коэффициент распознавания речи равный 0,15, что является неприемлемым для проведения акустической разведки в соответствии с табл. 4.

Выводы

1. Как показали расчеты, при использовании описанной методики выбора параметров узконаправленных микрофонов все виды микрофонов обладают речевой разборчивостью, достаточной для однозначного и безошибочного восприятия речевой информации.

2. У микрофона органного типа и линейной группы микрофонов параметр d определяет значение максимальной рабочей частоты, а параметр L – значение индекса направленности.

3. Максимальная рабочая частота узконаправленных микрофонов находится из формул [2]:

– трубчатый микрофон:

$$F_{\max_{\text{орг}}} \leq \frac{c}{2 \cdot d}; \quad (12)$$

– линейная группа микрофонов:

$$F_{\max_{\text{лин}}} \leq F_{\max_{\text{орг}}} * 1,5 \leq 1,5 * \left(\frac{c}{2 \cdot d}\right); \quad (13)$$

– у рефлекторного микрофона значение максимальной рабочей частоты не ограничено.

4. Параболический микрофон обладает очень малым ИН на низких частотах и не имеет ограничений по максимальной рабочей частотой.

5. Наилучшими показателями при одинаковых габаритных размерах обладают следующие микрофоны в порядке убывания: рефлекторный, линейная группа микрофонов и трубчатый микрофон органного типа.

Список литературы: 1. Абалмазов Э.И. Направленные микрофоны: мифы и реальность: <http://vrtp.ru/index.php?CODE=article&act=categories&article=165>. 2. Сапожков М.А. Электроакустика : учебник для вузов / В.К. Иоффе, Г.С. Гензель. – М. : Связь, 1978. – 272с. 3. Шифрин Я.С. Антенны. – Хпарьков : ВИРТА им. Л.А.Говорова, 1976. – С. 99. – 408 с. 4. Акустическая экспертиза каналов речевой коммуникации / Дидковский В. С., Дидковская М. В., Продеус А. Н. – Киев, 2008. – 420.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 11.03.2013