

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ УЗКОНАПРАВЛЕННЫХ МИКРОФОНОВ

Введение

В [1] была предложена методика моделирования акустического канала утечки речевой информации, ориентированная на использование злоумышленником в качестве технических средств разведки (ТСАР) узконаправленных микрофонов.

Цель статьи – демонстрация применения модели в целях анализа возможностей узконаправленных микрофонов и оценки угрозы съема информации в конкретной ситуации.

Характеристики моделей ТСАР

Параметры ТСАР будут условно обозначены следующим образом: микрофонная решетка с количеством кардиоидных капсулей вдоль сторон $N_x = N_y = N$ и шагом между ними $d_x = d_y = d$, м; рефлекторный микрофон с диаметром отражателя D , м; трубчатый щелевой микрофон с длиной трубки L , м.

Характеристика направленности (ХН) микрофонных решеток не осесимметрична, т.е. зависит как от зенитного угла θ , так и от азимутального угла φ . ХН решетки с $N = 21$ и $d = 0.05$ м при изменении угла θ для фиксированных углов φ изображена на рис. 1. Уровень боковых лепестков минимален в плоскостях $\varphi = \pi/4$ и $\varphi = 3\pi/4$ (диагональных плоскостях), и максимален при $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi/2$.

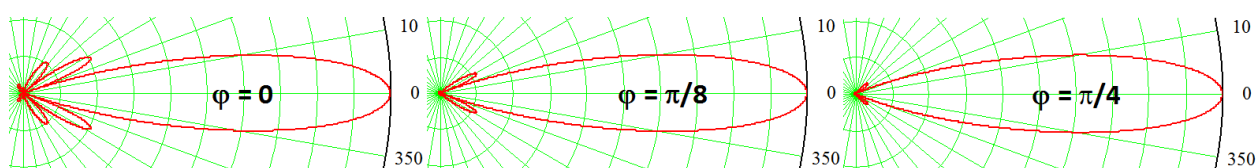


Рис. 1. ХН микрофонной решетки при фиксированных углах φ на частоте $f = 1$ кГц

Отметим некоторые особенности характеристик направленности микрофонной решетки в зависимости от параметров N и d :

- КНД решетки почти полностью определяется соотношением площади S и квадрата длины волны λ (КНД $\approx 4\pi S/\lambda^2$ [3]);
- у решетки с фиксированными габаритными размерами на более высокой частоте лепестки ХН уже, и КНД, соответственно, выше;
- с приближением отношения λ/d к единице начинают расти боковые лепестки, замедляя увеличение КНД. Соотношение λ/d , при котором КНД достигает максимума, тем ближе к 1, чем больше количество капсулей;
- увеличение количества капсулей (уменьшение шага между ними) при одинаковых габаритных размерах решетки несколько расширяет главный лепесток, но снижает уровень боковых лепестков;
- микрофонные решетки при равенстве отношений λ/d с одинаковым количеством микрофонов и их относительным расположением имеют идентичные ХН.

В отличие от микрофонной решетки рефлекторный микрофон имеет осесимметричную ХН. Распространенная ее аппроксимация характеристикой раскрыва с равномерным амплитудным распределением [1, формула (9)] физически не может быть реализована приемным капсулем с ненаправленной или кардиоидной ХН. Оценим отличия при помощи формулы (13) [1] для рефлектора диаметром 1 м с максимальным углом раскрыва $\pi/2$ при $f = 1$ кГц.

На рис. 2 слева направо представлены ХН при: равномерном амплитудном распределении, ненаправленном капсюле и кардиоидном капсюле.

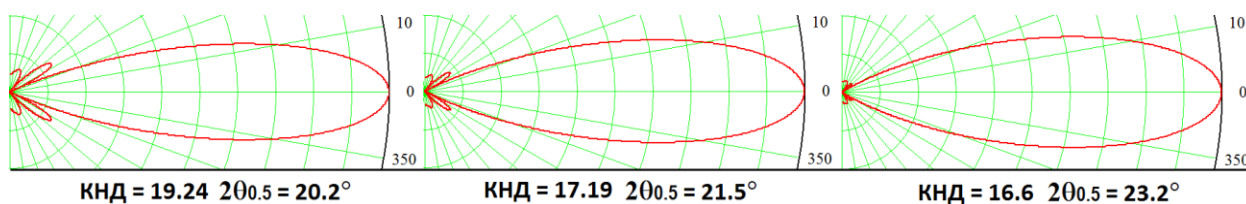


Рис.2. Влияние типа капсюля на ХН рефлекторного микрофона

Спад амплитуды к краям обеспечивает уменьшение уровня боковых лепестков. Главный лепесток при этом несколько расширяется ($2\theta_{0.5}$ на рис. 2 это ширина главного лепестка по уровню половинной мощности). Достоинством кардиоидного капсюля также является практически односторонне направленная ХН, что значительно уменьшает прием с переднего полупространства вне рефлектора по сравнению с ненаправленным капсюлем.

Трубчатый щелевой микрофон имеет наихудшие направленные свойства из трех рассматриваемых типов. Для сравнения, КНД у щелевого микрофона длиной 2 м при $f = 1000$ Гц примерно равен КНД рефлекторного микрофона диаметром 0.6 м с кардиоидным капсюлем. Однако данный тип, очевидно, прост в маскировке и удобен в применении.

Сравнение эффективности ТСАР в приближении свободного пространства

Наглядно сравнить возможности двух конкурирующих по характеристикам ТСАР поможет моделирование на ЭВМ. Выберем микрофоны с параметрами, которые приводились в качестве примеров в предыдущем разделе: микрофонная решетка с $N = 21$ и $d = 0.05$ м, рефлекторный микрофон с $r = 0.5$ м. Микрофонные капсюли имеют кардиоидную ХН. Габаритные размеры достаточно велики для практического применения, однако больший размер рефлектора позволит повысить адекватность модели для более низких частот [1].

Рассмотрим ситуацию по выявлению полезного сигнала источника речи, окруженного с четырех сторон источниками шума находящимися на расстоянии 10 м от него (см. рис. 6). Результатом должны быть коэффициенты словесной разборчивости, которые можно было бы получить в любой точке пространства при помощи ТСАР, направленного на источник речи.

В данном случае интерес представляет пространственная селективность при приеме с дальней зоны и, в целях упрощения, зададим условия свободного пространства, в котором звук затухает только за счет дивергенции (расширения фронта волны). Также не будем предполагать ограничение по уровню собственных шумов микрофона. Координаты ТСАР и источников звука определим в одной плоскости. Расчет разборчивости проведем при помощи современной модификации метода Покровского [2].

На рис. 4 и 5 изображено пространственное распределение коэффициентов разборчивости речи в виде оттенков серого по сетке с шагом 1 м для микрофонной решетки (слева) и рефлекторного микрофона (справа) при двух разных уровнях изотропного шумового фона. В качестве последнего был выбран розовый шум с интегральным уровнем L_N в полосе 180 – 5600 Гц.

Источник речи создает уровень звука 60 дБ на расстоянии 1 м, источники шума – 75 дБ и имеют спектр огибающей речевого сигнала. В табл. 1 приведены некоторые значения коэффициентов разборчивости для рис. 4 и 5 в соответствии с координатной сеткой (ось Y ориентирована вертикально, ось X – горизонтально, координаты источника – 65:65). Скорость звука для расчетов была выбрана равной 330 м/с, что соответствует температуре примерно 0°C.

Общий вывод, который можно сделать из рис. 4, 5 и табл. 1, заключается в том, что рефлекторный микрофон обеспечивает более стабильный прием в условиях наличия мощных локализованных источников помех за счет малого УБЛ. Для микрофонной решетки зоны

равной разборчивости в таких условиях несколько “рваные”. Однако при равном уровне изотропного шумового фона решетка обеспечивает большую дальность прослушивания за счет преимущества в КНД, а точечные источники помех создают для нее более узкие “зоны зашумления” из-за меньшей ширины главного лепестка. Преимущество рефлектора в относительной близости локальных источников помех заметно, если их уровень значительно превышает уровень фонового шума.

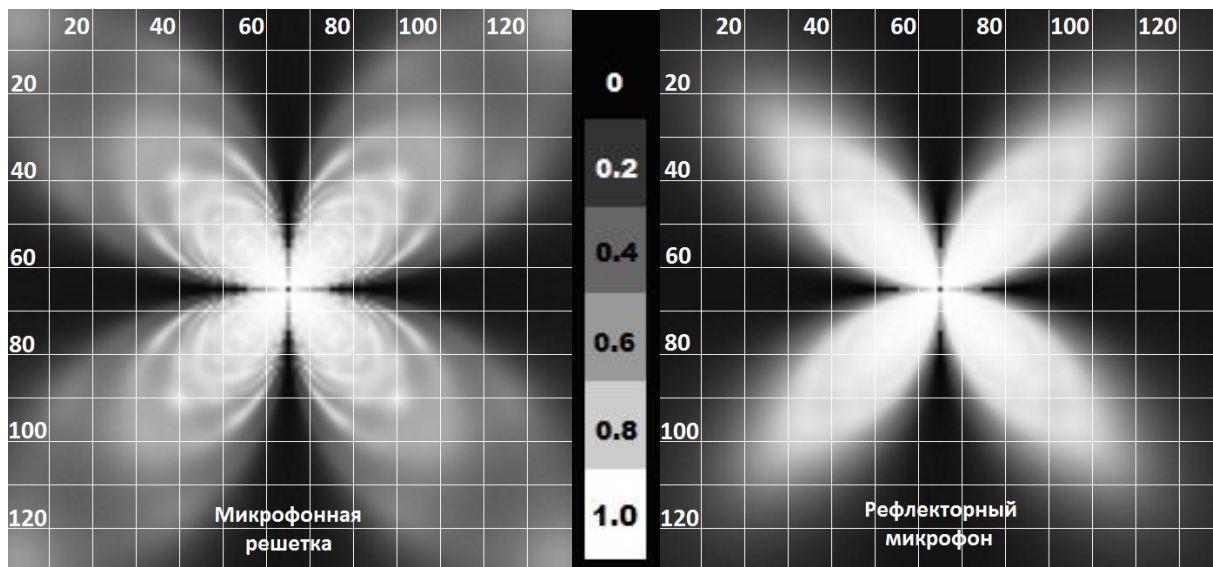


Рис. 4. Распределение разборчивости при $L_N = 30 \text{ дБ}$

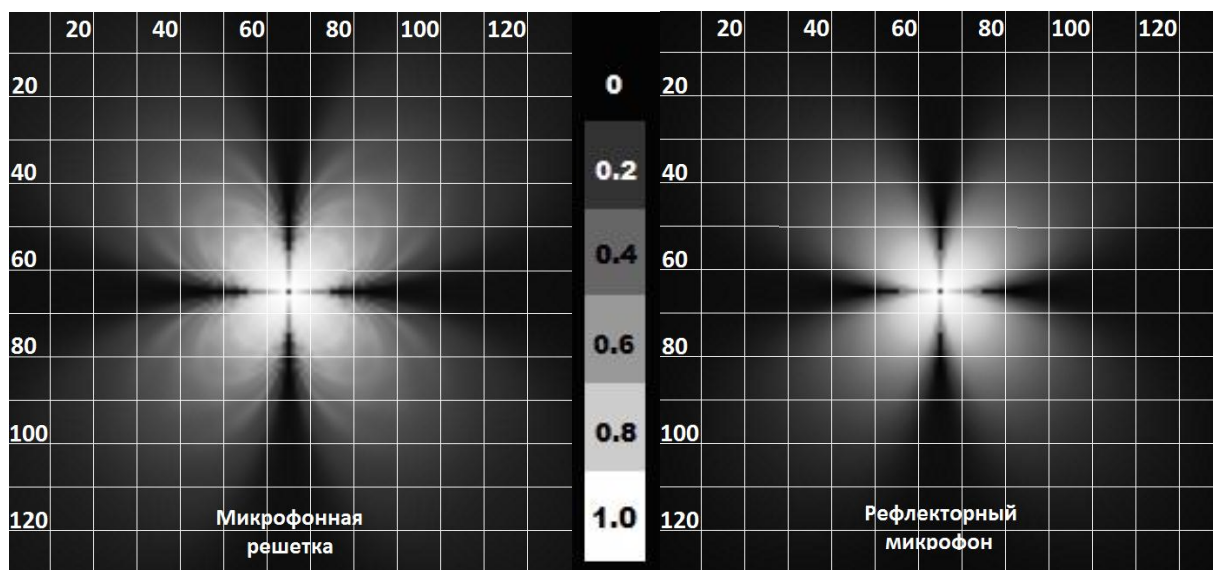


Рис. 5. Распределение разборчивости $L_N = 60 \text{ дБ}$

Таблица 1

Значение разборчивости речи в зависимости от расположения ТСАР

Координаты ТСАР (X:Y, м)	75:75	80:80	90:90	100:100	115:115	130:130	65:35
Решетка при $L_N = 30 \text{ дБ}$	0.95	0.85	0.92	0.66	0.39	0.57	0.07
Рефлектор при $L_N = 30 \text{ дБ}$	0.98	0.96	0.85	0.81	0.32	0.14	0.06
Решетка при $L_N = 60 \text{ дБ}$	0.81	0.59	0.37	0.23	0.12	0.08	0.06
Рефлектор при $L_N = 60 \text{ дБ}$	0.73	0.52	0.23	0.15	0.07	0.04	0.06

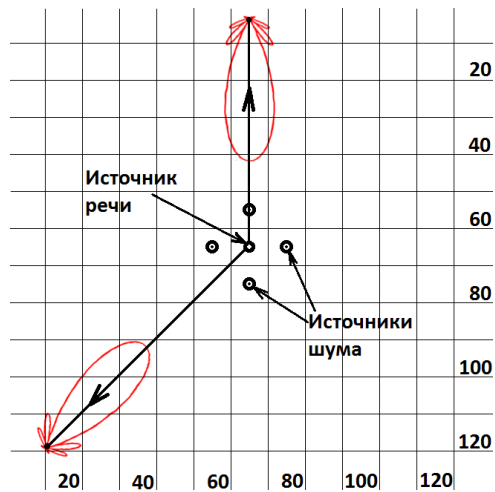


Рис. 6. Расположение источника речи и источников шума

Для микрофонной решетки достаточно просто обеспечить суммирование напряжений от различных капсулей с регулируемыми коэффициентами. Это позволит управлять соотношением уровня боковых лепестков и ширины главного лепестка и сведет на нет указанные преимущества рефлекторного микрофона. Но его достоинством, очевидно, является меньший уровень собственных шумов, так как N микрофонных капсулей будут вносить в \sqrt{N} раз больше собственного шума, чем одна капсуль.

Использование модели для оценки эффективности акустического экрана при применении узконаправленных микрофонов

Смоделируем приближенную к реальности ситуацию перехвата речевой информации на открытом пространстве. Источник речи – люди, сидящие за столом на территории загородного участка. По периметру расположены камеры наблюдения. Задача злоумышленника, находящегося за территорией участка, – подслушать их разговор, не привлекая внимание охраны. Схематическое изображение описанной ситуации показано на рис. 6 (масштаб не соблюден). Техническое средство разведки – замаскированный, например, под большой зонт трубчатый щелевой микрофон с длиной трубки 1.5 м. Высота забора $H = 3$ м, источника речи – $h_s = 1,5$ м, микрофона – $h_r = 1,8$ м, расстояние от забора до источника речи $D_s = 8$ м, расстояние от забора до злоумышленника $D_r = 4$ м.

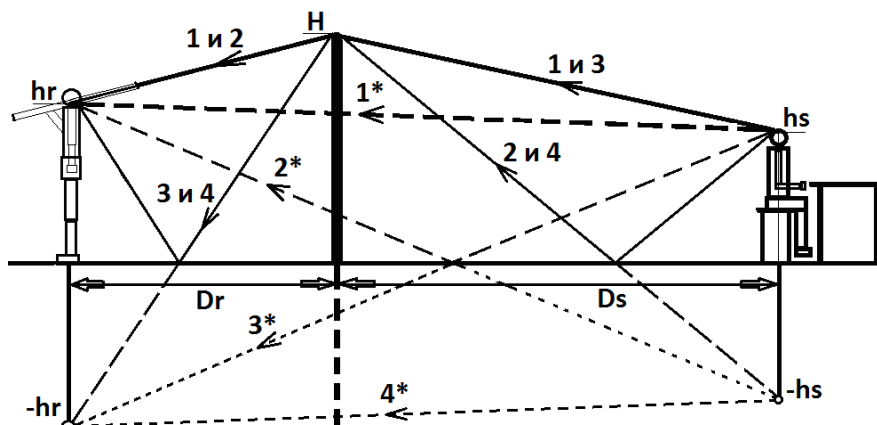


Рис. 7. Схема прослушивания разговора за ограждением

Расчет экранирования произведем с применением формулы (25) [1]. Выражение представляет собой аппроксимацию экспериментальных данных Маекавы, полученных для модели полубесконечного экрана в виде вертикальной стенки (при отсутствии влияния отражаю-

щих поверхностей). Сравнение с результатами экспериментов, приведенное в [5], показало, что она дает оценку примерно по нижнему пределу.

Для расчетов зададим твердую поверхность земли с коэффициентом отражения, стремящимся к единице. При этом существуют четыре возможные пути распространения звука от источника к приемнику: через кромку экрана без отражений, с одним отражением до экрана, с одним отражением после экрана, двумя отражениями до и после экрана [5]. На рис. 7 они обозначены номерами в соответствующем порядке. Прямой звук, проникающий сквозь барьер, учитывать не будем при любом ослаблении за счет экранирования, считая стенку достаточно массивной для обеспечения необходимой звукоизоляции.

Согласно методике моделирования звукоотражения [1] введем воображаемые источник и приемник, являющиеся зеркальными отображениями реальных, и исключим из внимания отражающую поверхность. Экран при этом сочтем полубесконечным. Пути распространения звука при отсутствии экрана, необходимые для расчета чисел Френеля, на рис. 7 обозначены цифрами со звездочками для соответствующих путей дифрагирующего звука. На рис. 9 изображены зависимости ослабления, вносимого экраном для каждого из них на частоте 1 кГц, в зависимости от его высоты.

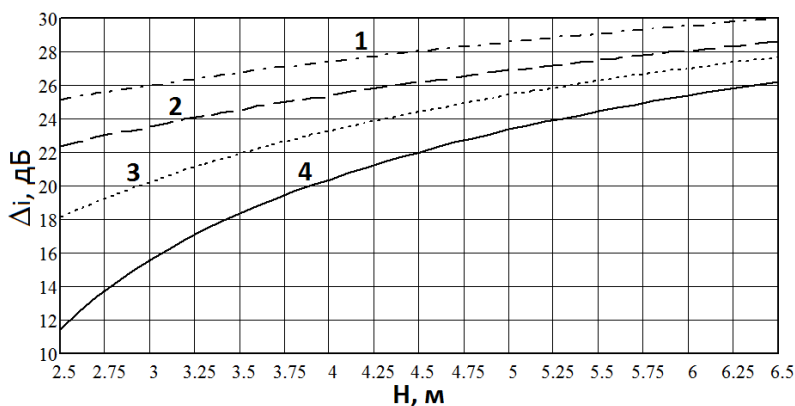


Рис. 9. Ослабление экраном звука для разных путей распространения в зависимости от его высоты при $h_s = 1.5$ м, $h_r = 1.8$ м, $D_s = 8$ м, $D_r = 4$ м

Необходимо также учесть наличие у приемника характеристики направленности, так как звук по путям 3 и 4 приходит под углом к рабочей оси. Выразив нормированную ХН ТСАР через геометрические соотношения, получим для них зависимость относительной чувствительности от расстояния до экрана. На рис. 10 показаны зависимости ослабления сигналов от расстояния при учете ХН.

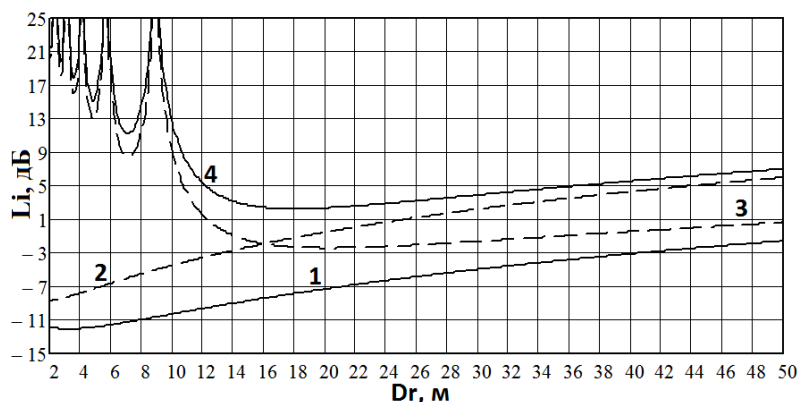


Рис. 11. Ослабления сигнала для различных путей распространения звука частоты 1000 Гц при $H = 3.3$ м, $h_s = 1.5$ м, $h_r = 1.8$ м, $D_s = 8$ м, $D_r = 4$ м

При наличии отраженных от земли волн возникает вопрос о степени влияния интерференции. Моделирование на ЭВМ, выполненное из расчета на то, что формантный подход пренебрегает различием плотности вероятности наличия формант и спектрального уровня в пределах октавных полос, показало, что учет интерференционных явлений не вносит существенных изменений в разборчивость. Приведенные далее результаты получены при сложении интенсивностей звука.

В качестве модели шумового сигнала были использованы полученные при помощи Фурье-анализа октавные уровни записи, сделанной в загородной местности при интегральном уровне L_N в полосе частот 90 – 11200 Гц. Однако не рекомендуется использовать приведенные уровни в качестве справочных данных. Скорость звука была принята равной 340 м/с, что соответствует температуре примерно 18 °С.

Для уровня речи на расстоянии 1 м от источника $L_s = 60$ дБ, интегрального уровня фонового шума $L_i = 35$ дБ и условий, указанных в начале раздела, словесная разборчивость W при ненаправленном приеме составляет 0.2.

Традиционно считается, что узконаправленные микрофоны применяются для прослушивания источников звука в пределах прямой видимости, но логика подсказывает, что подавление постороннего шума должно помочь и в данном случае. Направленный на кромку ограждения-экрана (или немного выше) в сторону прихода речевого сигнала микрофон в теории должен обеспечить заметное повышение отношения сигнал/шум. Результаты расчетов дают цифры $W = 0.83$, что позволяет вести прослушивание. Промежуточные расчетные значения по октавным полосам сведены в табл. 2.

На рис. 7 – 9 показаны зависимости словесной разборчивости от некоторых параметров канала утечки. Сплошной линией изображена зависимость с учетом всех четырех путей распространения звука, штриховой линией – с учетом только пути №1, то есть, пренебрегая наличием земной поверхности. Штрихпунктирная линия построена для ненаправленного приема, учитывая все отражения от земли.

Таблица 2

Расчетные данные по октавным полосам

Центральная частота ОП, Гц	250	500	1000	2000	4000
Уровни речи на в 1 м от источника, дБ	56	56	51	46	43
Затухание для пути №1, дБ	33	35	38	42	45
Затухание для пути №2, дБ	37.2	40.2	43.2	46.2	49.2
Затухание для пути №3, дБ	40	43.1	46.1	49.1	52.1
Затухание для пути №4, дБ	42	45.1	48.1	51.1	54.1
Уровни речи в точке приема, дБ	25.3	22.3	14.3	6.3	0.3
Уровни шумового фона, дБ	28.5	28.2	29	31.8	32.3
Сигнал/шум без применения ТСАР, дБ	1.8	-0.9	-9.7	-20.5	-27
Нормированная ХН микрофона для путей №3 и 4	0.27	0.21	0.03	0.03	0.02
КНД микрофона, дБ	6.7	9.6	12.5	15.5	18.5
Сигнал/шум с применением ТСАР, дБ	7.7	7.8	1.9	-5.9	-9.4

Учет возможных метеорологических условий и особенностей отражения звука от поверхностей с разными характеристиками выходит за рамки данной статьи. Акустический импеданс “пористых” поверхностей, таких как рыхлая земля, снежный покров и густая трава

нельзя считать бесконечным. В таком случае фазовый сдвиг отраженной волны при малых углах падения стремится к 180° [4]. Однако это будет обуславливать дополнительное затухание и значения разборчивости окажутся еще ниже, поэтому допустимо не вносить связанных с этим поправок. Также не учитывались собственные шумы ТСАР в предположении, что злоумышленник сможет обеспечить необходимо малый их уровень.

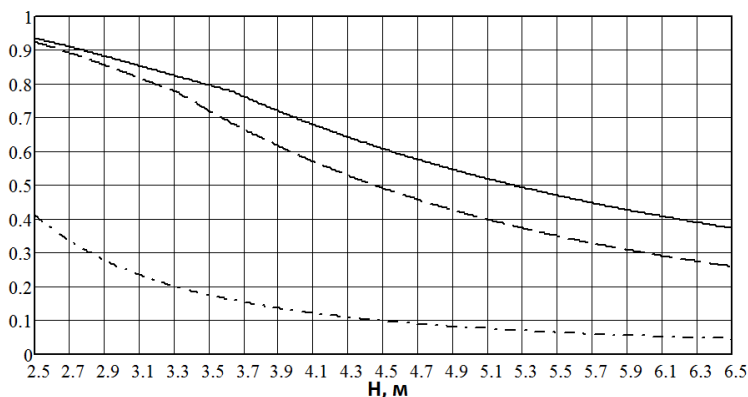


Рис.14. Зависимость словесной разборчивости от высоты ограждения при $h_s = 1.5$ м, $h_r = 1.8$ м, $D_s = 8$ м, $D_r = 4$ м, $L_n = 35$ дБ, $L_i = 60$ дБ

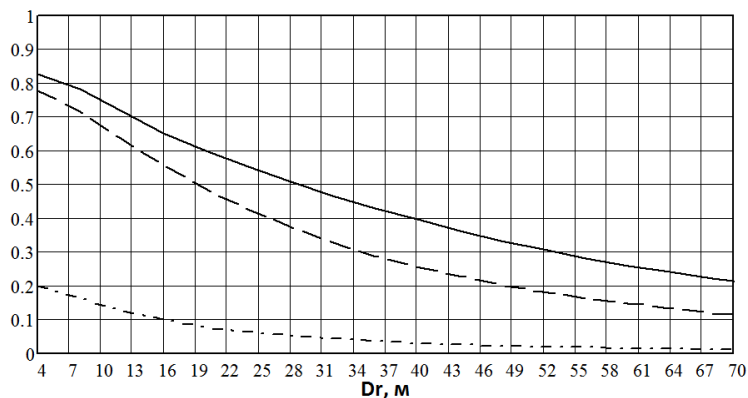


Рис.15. Зависимость словесной разборчивости от расстояния до ограждения при $H = 3.3$ м, $h_s = 1.5$ м, $h_r = 1.8$ м, $D_s = 8$ м, $L_n = 35$ дБ, $L_i = 60$ дБ

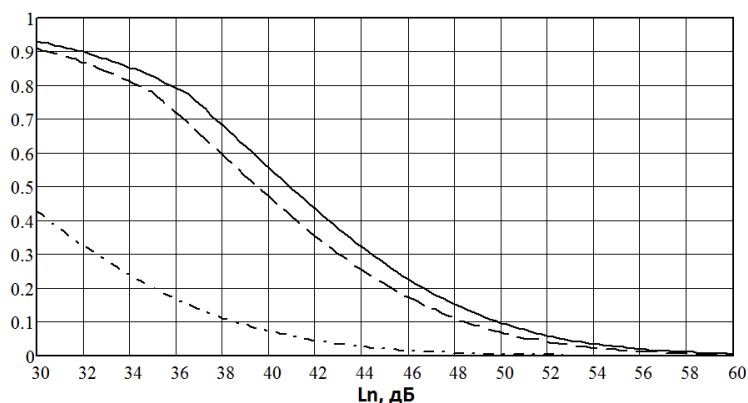


Рис.16. Зависимость словесной разборчивости от уровня шума при $H = 3.3$ м, $h_s = 1.5$ м, $h_r = 1.8$ м, $D_s = 8$ м, $D_r = 4$ м, $L_i = 60$ дБ

Выводы

1. Показан пример использования математической модели АКУРИ для оценки защищенности речевой информации в случае применения узконаправленного микрофона. Результаты приведены в виде графических зависимостей, а также таблицы численных значений по октавным полосам для частного набора параметров канала утечки.

Согласно методике оценки при высоте экрана 3 м, уровне фонового шума 40 дБ, уровне речевого сигнала 60 дБ, расстоянии от источника до экрана 8 м и расстоянии от экрана до приемника 4 м с помощью трубчатого щелевого микрофона длиной 1.5 м может быть получен коэффициент словесной разборчивости $W = 0.83$. Увеличение высоты ограждения до 6.3 м позволяет снизить разборчивость до 0.4. При увеличении расстояния до 74 м, коэффициент разборчивости падает ниже 0.2, а при увеличении уровня фонового шума до 50 – ниже 0.1.

Пренебрежение влиянием земли для рассмотренных значений параметров канала дает максимальное уменьшение разборчивости на 0.14.

2. Произведено сравнение возможностей плоской микрофонной решетки и рефлекторного микрофона в условиях свободного пространства при заданной шумовой обстановке. Результаты представлены наглядно, в виде пространственного распределения коэффициентов разборчивости речи.

При одинаковых габаритных размерах большой КНД решетки дает заметное преимущество по дальности прослушивания, так как лучше подавляет изотропный шумовой фон. Однако малый уровень боковых лепестков рефлекторного микрофона полезен при относительной близости сильных источников шума.

Список литературы: 1. Олейников А.Н., Широкий О.М. Математическая модель акустического канала утечки речевой информации // Радиотехника. – 2014. – №177. 2. Железняк В. К., Макаров Ю. К., Хореев А. А. Некоторые методические подходы к оценке эффективности защиты речевой информации // Специальная техника. – 2000. – № 4. – С. 39 – 45. 3. Шифрин Я.С. Антенны – ВИРТА им. Говорова Л.А., 1976. – 408 с. 4. Справочник по технической акустике : пер. с нем. ; под ред М. Хекла и Х.А. Мюллера. – Л. : Судостроение, 1980. – 440 с. 5. Keith Attenborough, Kai Ming Li, Horoshenkov Kiril Predicting Outdoor Sound. – London and New York: Tailor & Francis Group, 2007.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 07.04.2014