

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА УТЕЧКИ РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Введение

Моделирование канала утечки позволяет априорно оценить возможности злоумышленника при заданных пространственных и энергетических условиях разведывательного акустического контакта, что может быть полезным на этапе планирования мероприятий по защите речевой информации.

В работе [1] был предложен вариант построения такой модели. Цель данной статьи – оценка защищенности акустического канала речевой информации (АКУРИ) в условиях применения узконаправленных микрофонов.

На рис. 1 изображено схематическое представление АКУРИ, которое традиционно содержит источник речевого сигнала (ИРС), источник акустических помех (ИАП), среду распространения (СР), техническое средство акустической разведки (ТСАР). Финальным звеном является модель распознавания речевого сигнала (РРС).

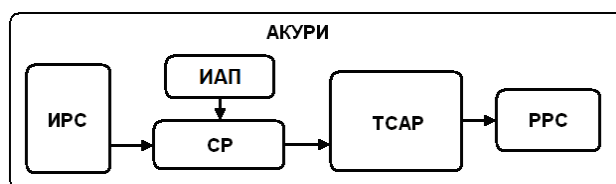


Рис. 1. Схема акустического канала утечки речевой информации

Методика оценки разборчивости речи

Модель РРС основывается на формантном подходе, который предполагает разбиение спектра речи на участки и вычисление коэффициента разборчивости (1):

$$A = \sum_{i=1}^N k_i p(E_i), \quad (1)$$

где i – номер частотной полосы, N – их число, k_i – коэффициенты наличия формант в полосах, $p(E_i)$ – коэффициенты восприятия, зависящие от отношений сигнал/шум. По известным зависимостям формантная разборчивость пересчитывается в словесную.

Существующие вариации формантного подхода отличаются определением “формантного спектра”, а также методикой получения коэффициентов восприятия. Сравнение отечественных версий Н.Б. Покровского, М.А. Сапожкова, Ю.С. Быкова и зарубежной версии AI (индекс артикуляции) показало немалые различия получаемых оценок [2 – 4]. Выделяются на фоне остальных результаты Быкова, работа которого была нацелена на распознавание команд для экипажей боевых машин. Полученные им коэффициенты восприятия дают заметно завышенные оценки, что обусловлено возможностью сравнения с априорно известным тематическим словарем [5].

В сфере ЗИ получила распространение модификация варианта Н.Б. Покровского, предложенного в работе [6]. В ней полученные Покровским зависимости аппроксимируются математическими выражениями, удобными для расчетов на ЭВМ и учитываются 5 октавных полос (ОП) с центральными частотами $f_c = 250, 500, 1000, 2000, 4000$ Гц. По мнению авторов, точность остается удовлетворительной. Однако к методу Покровского и, в частности, к

его модификации существует ряд претензий от специалистов [2 – 4, 7 – 9, 22]. В работе [22] рекомендуется увеличить частотное разрешение до 1/3 ОП и учитывать октавную полосу с $f_c = 8000 \text{ Гц}$, а в работах [7 – 9] было предложено вычислять коэффициент восприятия по формуле

$$p(E^*) = 0.05E^* + 1.25, \quad (2)$$

где E^* – относительный уровень С/Ш согласно версии Покровского. Авторы утверждают, что удалось добиться гораздо меньшего расхождения с экспериментом при прослушивании связанного текста, а основная проблема метода Покровского в том, что испытания с применением артикуляционных таблиц далеки от условий реального съема информации.

Модели технических средств акустической разведки

Массив соотношений сигнал/шум для среднегеометрических частот ОП или 1/3 ОП должен быть получен на выходе модели ТСАР, которое выполняет задачи их повышения за счет пространственной селекции помех (узконаправленные микрофоны) либо технических способов шумоочистки [1]. В рамках статьи будут рассматриваться три типа предполагаемых ТСАР – рефлекторный микрофон, плоская микрофонная решетка и трубчатый щелевой микрофон, как наиболее распространенные.

Не менее известные микрофоны органного типа зачастую являются неудобными для скрытного применения, уступая по возможностям рефлекторным микрофонам [10], которые тоже сравнительно непросто замаскировать.

Математической моделью узконаправленного микрофона является его характеристика направленности (ХН) – зависимость чувствительности от направления прихода сигнала. Если считается, что помеха приходит равномерно со всех направлений (изотропный шумовой фон), для расчета С/Ш применяется коэффициент направленного действия (КНД) – отношение квадрата чувствительности в заданном направлении к среднему квадрату чувствительности по всем направлениям [11, 32, 33]:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi E^2(\theta, \varphi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi E^2(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi}, \quad (3)$$

где $E(\theta, \varphi)$ – характеристика направленности в сферической системе координат, θ и φ – зенитный и азимутальный углы, соответственно. Для удобства часто используют ХН нормированную к уровню главного максимума:

$$R(\theta, \varphi) = \frac{E(\theta, \varphi)}{E_{MAX}(\theta, \varphi)} \quad (4)$$

При заданном направлении прихода помехи применяется коэффициент защитного действия (КЗД) – отношение чувствительности в направлении прихода сигнала к чувствительности в направлении прихода помехи.

Применительно к системам дискретно или непрерывно распределенных излучателей либо приемников, которыми являются узконаправленные микрофоны, существует понятие множителя направленности [11, 30]. Его можно определить как функцию, дающую ХН системы, будучи умноженной на ХН элементарного приемника.

Микрофонные решетки представляют собой набор микрофонов, расположенных в одной плоскости по сетке с заданным шагом. Звуковые волны, приходящие во фронтальном осевом направлении, складываются в фазе, а с иных направлений – со сдвигом фаз, что приводит к их ослаблению. При этом предполагается, что источник находится на значительном расстоянии, а фронт волны плоский. ХН решетки описывается выражением (5) [13]:

$$R(\theta, \varphi) = R_1(\theta, \varphi) \cdot \frac{\sin \left[\frac{N_x \pi d_x}{\lambda} \cos(\varphi) \sin(\theta) \right]}{N_x \sin \left[\frac{\pi d_x}{\lambda} \cos(\varphi) \sin(\theta) \right]} \cdot \frac{\sin \left[\frac{N_y \pi d_y}{\lambda} \sin(\varphi) \sin(\theta) \right]}{N_y \sin \left[\frac{\pi d_y}{\lambda} \sin(\varphi) \sin(\theta) \right]}, \quad (5)$$

где λ – длина волны, м; N_x и N_y – количество микрофонов вдоль сторон; d_x и d_y – соответственно, шаг между ними, м; $R_1(\theta, \varphi)$ – ХН единичного микрофона, которая для обеспечения односторонней направленности может являться кардиоидой:

$$R_1(\theta) = 0.5(1 + \cos(\theta)). \quad (6)$$

КНД решетки практически полностью зависит от ее размеров, расстояние между микрофонами ограничивает рабочий диапазон по частоте, а их количество определяет структуру боковых лепестков, следовательно, тоже влияет на направленные свойства.

При съеме информации на расстояниях, сравнимых с размерами решетки сферичность волны обуславливает несинфазность приема в осевом направлении. Близость повлияет также и на прием звука от источников помех (рис. 2). Изменения будут незначительны, если максимальное смещение фазы не превысит $\pi/4$ [14].

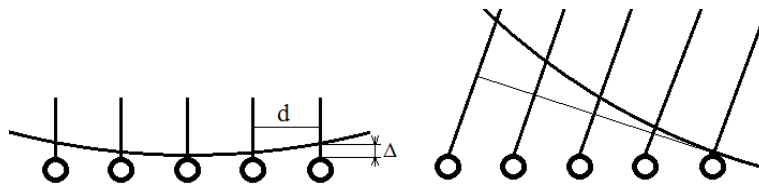


Рис. 2. Влияние сферичности волны на прием микрофонной решеткой

В целях анализа работы решетки в условиях близости к источнику звука можно воспользоваться математической моделью для расчета на ЭВМ (7), суммирующей звуковые давления с учетом затухания и фазы для каждого капсюля в составе решетки. Ее можно представить в условно нормированном виде (8), разделив на количество микрофонов, осевую чувствительность капсюля и давление на опорном расстоянии:

$$U(x, y, z) = p_0 r_0 \sum_{i=1}^N \frac{\exp \left(j \frac{2\pi}{\lambda} r_i(x, y, z) \right) E_i(x, y, z)}{r_i(x, y, z)}; \quad (7)$$

$$F(x, y, z) = \frac{r_0}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\exp \left(j \frac{2\pi}{\lambda} r_i(x, y, z) \right) R(x, y, z)}{r_i(x, y, z)}, \quad (8)$$

где i – номер капсюля, N – их количество; $r_i(x, y, z)$ – расстояние до i -го капсюля от точки с заданными декартовыми координатами, м, p_0 – давление, Па, которое развивает источник на опорном расстоянии r_0 , м, $E(x, y, z)$ – чувствительность i -го капсюля в направлении приходя звука от (x, y, z) , В/Па, $U(x, y, z)$ – ЭДС на выходе микрофонной решетки, В, $R(x, y, z)$ – нормированная ХН i -го микрофона в направлении на (x, y, z) .

Щелевой микрофон представляет собой трубку с продольными отверстиями либо щелью, которую можно представить как систему дискретно либо непрерывно распределенных приемников [11]. В конце трубки находится капсюль микрофона. Звуковые волны, приходящие в осевом направлении, проходят одинаковое расстояние до капсюля и складываются в фазе. Пришедшие с других направлений волны достигают различных точек трубки и суммируются в приемнике с разными фазами (рис. 3) [12]. Не являясь дискретной принимающей

системой, микрофон с щелью не имеет таких жестких ограничений по диапазону частот, как микрофонная решетка. Его ХН описывается выражением (9), в котором L – длина приемной трубки микрофона, m [11]. Элементарный приемник системы, которым в данном случае является участок трубки, считают ненаправленным:

$$R(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi L}{\lambda}[1 - \cos(\theta)]\right)}{\frac{\pi L}{\lambda}[1 - \cos(\theta)]}. \quad (9)$$

Выражение (7) применимо и для данного типа микрофонов, при этом $r_i(x, y, z)$ – сумма расстояния от точки пространства с координатами x, y, z до i -го отверстия и расстояния от этого отверстия до капсюля микрофона. А в случае непрерывной щели (расстояние между отверстиями стремится к нулю) сумма переходит в интеграл:

$$F(x, y, z) = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{\exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} [r(x, y, z, \delta) + L - \delta]\right)}{r(x, y, z, \delta)} d\delta, \quad (10)$$

где $r_i(x, y, z, \delta)$ – расстояние от точки (x, y, z) до точки щели, отстоящей на δ от конца трубки, противоположной капсюлю.

Чувствительность щелевого микрофона при осевом приходе звука не зависит от расстояния, но близость источника сказывается на приеме с других направлений (рис. 3).

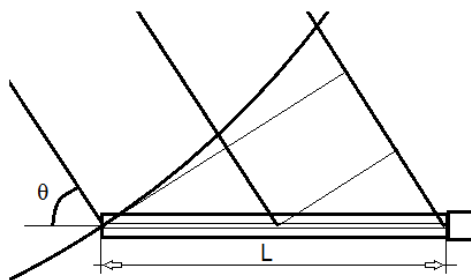


Рис. 3. К пояснению принципа работы щелевого микрофона

Рефлекторный микрофон концентрирует звуковые волны, приходящие в осевом направлении, в фокусе отражателя. ХН обычно аппроксимируется множителем круглого синфазного раскрыва с равномерным амплитудным распределением [10, 11].

$$R(\theta) = \frac{2J_1\left(\frac{2\pi\rho_0}{\lambda}\sin(\theta)\right)}{\frac{2\pi\rho_0}{\lambda}\sin(\theta)}, \quad (11)$$

где ρ_0 – радиус отражателя, m ; $J_1(x)$ – функция Бесселя первого порядка.

Учесть неравномерность амплитуды можно, связав ее с ХН капсюля в фокусе отражателя через геометрические соотношения (12), где $f(\theta)$ – множитель направленности, ρ – расстояние от точки раскрыва до его центра, $A(\rho)$ – амплитудное распределение, F – фокусное расстояние, $R(\alpha)$ – ХН капсюля, ориентированная по оси к центру отражателя, α_0 – максимальный угол раскрыва, J_0 – функция Бесселя нулевого порядка [11, 15].

$$f(\theta) = 2\pi \int_0^{\alpha_0} A(\rho) J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda} \rho \sin(\theta)\right) \rho d\rho = 4\pi F^2 \int_0^{\alpha_0} J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda} \rho_0 \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}} \sin(\theta)\right) R(\alpha) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} d\alpha. \quad (12)$$

Рефлекторный микрофон не ограничен сверху по частотному диапазону, но его математическая модель сталкивается с проблемами на низких частотах. Функции (11) и (12) симметричны относительно плоскости раскрыва, и в заднем полупространстве их приходится полагать равными нулю, а при $2\rho/\lambda > 1$ это очевидно некорректно. Грубо учесть дифракцию можно умножением на (6) [15], но другая проблема состоит в том, что амплитудное распределение определяется по законам геометрической оптики, которые безошибочно применимы для размеров отражателя и расстоянии от капсуля до него значительно превышающих длину волны [30].

Также не учитывается затенение раскрыва и прием с переднего полупространства мимо рефлектора. Для минимизации последнего фактора целесообразна кардиоидная ХН капсуля, что немного снизит КНД множителя из-за расширения главного лепестка, но ослабит боковые и обеспечит гораздо меньший прием вне рефлектора.

Принятый узконаправленным микрофоном сигнал может быть подвергнут дополнительной шумоочистке, что необходимо учесть при оценке защищенности. Возможные диапазоны повышения С/Ш в октавных полосах, полученные по результатам различных исследований приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1

Оценки возможностей шумоочистки

$F_{\text{ср}}, \text{Гц}$	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\Delta \text{С/Ш}, \text{дБ}$	1.5 – 2.5	4.0 – 7.0	4.0 – 7.0	3.0 – 6.0	1.5 – 3.0	0.5 – 1.5	0.5 – 0.2

Моделирование распространения звука в свободном пространстве

Поскольку строгий расчет излучения и распространения звуковых волн является сложной задачей, принимают ряд упрощений, а затем вносятся некоторые поправки. Первое из них это свободное звуковое поле, в котором излучение происходит без отражения, поглощения и рассеивания. При этом интенсивность I , $[Bm/m^2]$ на расстоянии r , $[m]$ от источника связана с его мощностью P , $[Bm]$ следующим соотношением [17, 32]:

$$I_{\Pi} = P \cdot \Pi = \frac{P \cdot \Phi}{S(r)}, \quad (13)$$

где Π – ослабление прямого звука, Φ – фактор направленности, дБ , который показывает степень выигрыша по излучаемой мощности в направлении на приемник по сравнению с ненаправленным излучателем; $S(r)$ – условная площадь, по которой распределяется звуковая энергия на заданном расстоянии. Если расстояние до источника звука гораздо больше его максимального габарита l_{max} , применяют модель точечного излучателя [16]:

$$\Pi = \frac{\Phi}{\Omega r^2}, \quad (14)$$

где; Ω – пространственный угол излучения, ср, для источника на поверхности $\Omega = 2\pi$, в двухгранном углу – π , в трехгранном – $\pi/2$. Формула (14) справедлива начиная с расстояния $r = (2 \dots 5) l_{\text{max}}$ [16], а чаще всего применяют условие $r > 2l_{\text{max}}$ [16, 18]. На более близких расстояниях фронт волны приблизительно повторяет форму источника. Метод расчета для излучателя в форме параллелепипеда приведен в [18, с 292].

Если поверхность излучает неравномерно, ее стоит разбить на участки и произвести расчет отдельно для каждого. При условии некогерентности (несогласованности) источников

суммируются их интенсивности. Некогерентность является еще одним важным для расчетов приближением [16]. В частности условие дальней зоны (15) отпадает для излучателей, которые можно представить из большого числа малых некогерентных источников. Но расчет в непосредственной близости от источников в любом случае ограничивает условие (20) [16]:

$$r > \frac{l_{\max}^2}{\lambda}; \quad (15)$$

$$r > \lambda. \quad (16)$$

Помимо точечного применяют модели линейных и площадных излучателей. Источник можно считать линейным, если расстояние до него намного меньше одного из его габаритных размеров ($r < l_{\max}/\pi$ [17]), но значительно превышает остальные (на практике хотя бы в два раза). Он излучает цилиндрические волны, и уровень звука уменьшается на 3 дБ с каждым удвоением расстояния. Площадным излучателем считается поверхность, расстояние до которой значительно меньше минимального из его габаритных размеров ($r < l_{\min}/\pi$ [17]). Он является источником плоских волн, которые не затухают в свободном поле.

Моделирование звука в замкнутом пространстве

Расчет звука в помещениях производится при помощи статистической теории [32, 34]. Уровень звука в произвольной точке соразмерного ($5 \geq l_{\max}/l_{\min}$) помещения определяется как сумма интенсивностей прямого и диффузного звука. О расчете звукового поля в несоизмеримых помещениях можно узнать из [16, с 192].

Диффузное поле – равномерно распределенные по всему объему отраженные звуковые волны. Как и свободное поле, оно является необходимой идеализацией, при которой все направления прихода звуковой волны равновероятны (изотропность) и плотность энергии во всех точках одинакова (однородность). Интенсивность звука рассчитывается по формуле (21), в которой B – акустическая постоянная, m^2 (22) [16].

$$I_d = \frac{4P}{B}; \quad (17)$$

$$B = \frac{A}{1 - \alpha_{CP}}, \quad (18)$$

где A – эквивалентная площадь звукопоглощения, m^2 ; α_{CP} – средний коэффициент звукопоглощения определяемые по формулам (19) и (20) соответственно:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^m A_j n_j; \quad (19)$$

$$\alpha_{CP} = \frac{A}{S_{огр}}. \quad (20)$$

где α_i – коэффициент звукопоглощения i -й поверхности; S_i – площадь i -й поверхности; A_j – звукопоглощение j -го звукопоглотителя; n_j – количество j -х звукопоглотителей; $S_{огр}$ – суммарная площадь ограждающих поверхностей, m^2 . Условие применимости статистической теории определяется из соотношения (21), где V – объем помещения [17].

Формантный подход не учитывает реверберационную помеху, которая будет снижать разборчивость при времени эквивалентной (ощущаемой) реверберации (22) выше оптимального (25). Стандартное время реверберации T_{60} , за которое энергия реверберирующего звука спадает на 60 дБ, определяют по формуле Сэбина (23), а акустическое отношение R – отношение энергии отраженного и прямого звука – по формуле (24) [2, 23]. Зависимости оптимального времени реверберации от частоты можно найти в [32].

$$f_{ГР} = 500 \cdot V^{-1/3}; \quad (21)$$

$$T_{ЭР} = \frac{1,2T_{60}}{1,2 + T_{60} \lg[(D_M + R)/R]}; \quad (22)$$

$$T_{60} \approx \frac{0,161}{-S_{ОГР}(\ln(1 - \alpha_{СР}))}; \quad (23)$$

$$R = \frac{16\pi r}{S_{ОГР} D_{И} R_{И}^2(\theta, \varphi)} \frac{1 - \alpha_{СР}}{\alpha_{СР}}; \quad (24)$$

$$T_{ОПТ} = 0,3 \log(V) - 0,05, \quad (25)$$

где D_M , – КНД микрофона, $D_{И}$ – осевой КНД источника, $R_{И}(\theta, \varphi)$ его нормированная ХН.

В работе [39] предлагается учесть реверберационную помеху, считая шумом энергию отраженного звука, приходящего после 50 мс. Немаловажным является то, что направленный микрофон ослабляет диффузный звук при приеме на коэффициент направленного действия [19].

Учет влияния препятствий при распространении звука

Звукоотражение моделируют при помощи мнимого источника, являющегося зеркальным отображением действительного (рис. 4), если выполняется условие (26). Уровень мощности мнимого источника находят из соотношения (27) [24].

$$\frac{1}{\lambda} > \frac{2d_{s,o}d_{o,r}}{(1_{\min} \cos \beta)^2(d_{s,o} + d_{o,r})}; \quad (26)$$

$$Lw_{im} = Lw + 10 \lg(\rho) + D_{Ir} + 10 \lg \Omega, \quad (27)$$

где Lw – уровень мощности реального источника; Ω – пространственный угол излучения источника ρ – коэффициент отражения поверхности при данном угле падения; D_{Ir} – коэффициент направленности мнимого источника в направлении на приемник, равный фактору направленности источника в направлении SO . Также можно воспользоваться и моделью мнимого приемника, который является зеркальным отображением реального [38].

В случае достаточной разности хода источники считаются некогерентными и суммируются их интенсивности [16]. Когерентные волны интерферируют и складываются их давления с учетом фазы. Если расстояние от источника или приемника до поверхности не превышает $\lambda/4$, повышение уровня может достигать 6 дБ [16, 21].

В точку приема обычно приходят как минимум две волны – прямая и отраженная от земли. При небольших высотах источника и приемника они могут гасить друг друга за счет интерференции [16, 20]. Когда поверхность имеет достаточно малый акустический импеданс, как, например, снежный покров, рыхлая почва или густая трава, сдвиг фазы отраженной волны при малом угле падения приближается к 180° . Стандарт [23] предлагает оценить это с помощью несложных формул, которые, однако, достаточно громоздки.

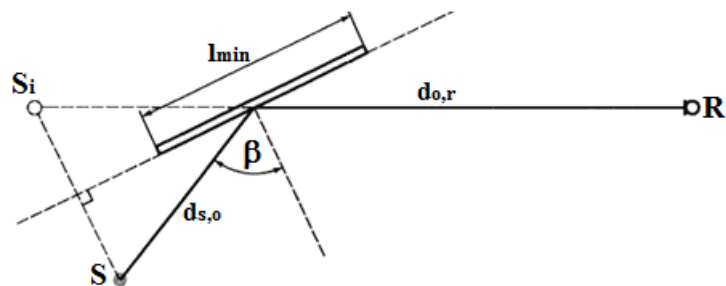


Рис. 4. Схема построения мнимого источника звука

Объект считается экраном если его поверхностная плотность не менее 10 кг/м^2 ; поверхность без больших просветов и размер в направлении, перпендикулярном к пути распространения звука превышает длину звуковой волны ($l_s + l_r > \lambda$, рис. 5, а) [24].

Наибольшее распространение для инженерных расчетов получили аппроксимации экспериментальных данных Маекавы [16 – 18, 24, 25]. Чаще всего встречается вариант (28) который, по некоторым оценкам [25], имеет погрешность не более 3 дБ:

$$\Delta L_{\text{ЭКР}} = 20 \log \left(\frac{\sqrt{2\pi N}}{\text{th}(\sqrt{2\pi N})} + 5 \right), \quad (28)$$

где $N = 2\delta/\lambda$ – число Френеля, в котором δ – разность пути прямого распространения звука при отсутствии экрана и пути дифрагирующего звука ($d_{SR} + d_{SS} - d$, рис. 5, б). Предполагается, что экран полубесконечен, поэтому отдельно нужно учитывать земную поверхность [38]. При наличии нескольких путей дифракции звука (рис. 5, в), расчет производится для всех них, и результат определяется как среднеквадратичное значение. Если путь прямого распространения проходит над верхней кромкой экрана, то $\delta < 0$.

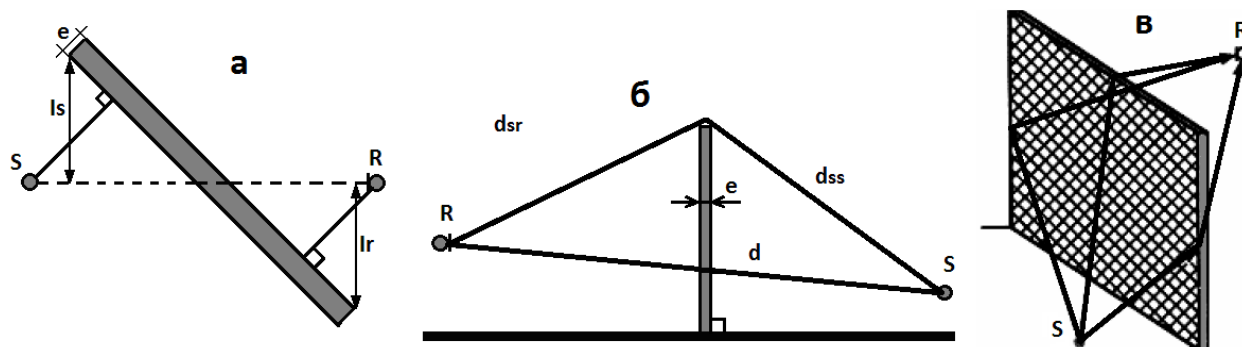


Рис. 5. К расчету ослабления звука экраном

Формула (28) применима при $N \geq -0.2$ [20]. Утверждается, что она занижает эффективность экранов с толщиной больше, чем длина волны ($e > \lambda$) и занижает для экранов с пологими склонами [18]. Ее модификация, применяемая в стандарте [24], позволяет учесть толщину экрана, а в [25] присутствуют поправки для форм экранов, отличных от вертикальных стенок и учета звукопоглощения поверхностями.

Если ослабление за счет экранирования соизмеримо с величиной звукоизоляции преграды, ее тоже следует брать в расчет.

При оценке звука, проникающего сквозь ограждающие конструкции, последние считаются источниками, излучающие по другую сторону с мощностью [17]:

$$P_{OK} = \frac{I_{nad} S_{OK}}{R \delta_d}, \quad (29)$$

где $I_{\text{пад}}$ – интенсивность падающего на преграду звука, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $S_{\text{ОК}}$ – площадь преграды, м^2 ; R – удельный коэффициент звукоизоляции на частоте, который определяется по справочным данным [31], либо рассчитывается по методикам, рекомендуемым в [18, 26, 37]. Для открытых проемов $R = 1$; δ_d – поправка, учитывающая характер проникающего звука. Поскольку в диффузном поле все возможные направления прихода звуковых волн считаются равновероятными, то на преграду падает четвертая часть интенсивности, рассчитанной по формуле (17), поэтому $\delta_d = 4$. Для прямого звука $\delta_d = 1$ [19, 21].

Если преграда состоит из участков с разной звукоизоляцией, то расчет производится отдельно для каждого, либо рассчитывается общая звукоизоляция [34]:

$$R = \frac{S}{\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{R_i}}, \quad (30)$$

где R_i и S_i – звукоизоляции и площади элементов ограждения, n – их количество.

Значительные трудности представляет расчет для отверстий и щелей, размеры которых меньше длины волны, так как из-за дифракционных эффектов для их площади проникает больше звуковой энергии, нежели следует из формулы (29). Расчетные формулы определенной степени точности присутствуют в [21, с. 204]. Способы расчета затухания звука, распространяющегося через воздухопроводы и каналы можно найти в [20].

Отдельно выделим задачу оценки излучения звука из помещения через открытое окно. Направленность диффузного поля при длинах волн не более его стороны предлагается определять по аналогии с правилом Ламберта как косинус зенитного угла. Для прямого звука не учет дифракции на прямоугольном отверстии окна может занижить результат при определенном расположении ТСАР и источника речи относительно него, что недопустимо в целях ЗИ. С достаточной точностью давление в точке приема можно рассчитать согласно принципу Гюйгенса по формулам (31) и (32) [15, 40, 41].

$$p(r, \theta, \varphi) = \frac{p_0 r_0}{r} \exp(jk(r - r_0)) R(\theta, \varphi); \quad (31)$$

$$p(x^*, y^*, z^*) = \frac{-jk\rho'c}{2\pi} \int_0^a \int_0^b \frac{v(x, y)}{r_{x,y}^*} \exp(jkr_{x,y}^*) dx dy, \quad (32)$$

где $p(r, \theta, \varphi)$ – давление, Па , создаваемая точечным источником на расстоянии r , м , в заданном направлении; p_0 – давление, Па , развиваемое им на опорном расстоянии r_0 , м ; $R(\theta, \varphi)$ – нормированная ХН источника; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $p(x^*, y^*, z^*)$ – давление, Па , создаваемое непрерывно распределенными в плоскости окна воображаемыми когерентными излучателями, излучающими в полупространство, в точке с координатами x^* , y^* , z^* ; ρ' – плотность среды; $r_{x,y}^*$ – расстояние, м , от элементарного излучателя с координатами x , y до точки с координатами x^* , y^* , z^* , при ориентированных вдоль сторон окна координатных осях; a и b – размеры сторон окна, м ; $m(S)$ – распределение колебательной скорости в плоскости окна, рассчитываемое при помощи формулы (31) с учетом геометрии взаимного расположения окна и источника, а также соотношения $p = \rho'v'c$, которое справедливо в дальней зоне.

Особенности распространения на открытой местности

Затухание из-за поглощения атмосферой определяют по таблицам [24] в зависимости от частоты, температуры, влажности и атмосферного давления. На расстояниях до 50 м , на которых обычно возможен съем информации, учитывать его не имеет смысла. Ослабление звука в листве также незначительно и учитывается, если она плотная. Табличные данные можно найти в [24].

Учет влияния ветра является сложной задачей. При его наличии звук отклоняется от прямолинейной траектории. Из-за градиента скорости ветра при распространении против него звуковые лучи загибаются вверх и на некотором расстоянии начинается т.н. “зона молчания”. В противном случае они пригибаются к земле, что способствует распространению. Тот же эффект наблюдается и при температурном градиенте. Соотношения для расстояний до зоны молчания и радиусов кривизны траекторий присутствуют в [20, 25]. Обычно радиусы составляют 4 – 6 км [16] и для расчетов принимают значение 5 км [24]. В частности, при попутном ветре, снижение эффективности экрана учитывают, считая прямой путь звука дугой окружности [20].

Формулы для учета затухания на неоднородностях воздуха за счет турбулентности приведены в [20]. Помимо этого может ослабевать когерентность волн, особенно на высоких частотах, а с ней – эффекты дополнительного усиления и ослабления при интерференции с отраженной волной, о которых упоминалось ранее [16].

Частотные характеристики звука

Для вычисления уровней речевого сигнала в ОП к интегральному уровню прибавляют соответствующие поправки, известные для усредненного спектра речи, которые приведены в табл. 2 [6, 36]. Поправки для 1/3 ОП можно найти в [36].

Таблица 2

Относительные спектральные уровни речевого сигнала в ОП

Верхняя частота, Гц	180	355	710	1400	2800	5600	11200
Центральная частота, Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Нижняя частота, Гц	90	180	355	710	1400	2800	5600
Поправка, дБ	-17	-4	-4	-9	-14	-17	-21

Ориентировочно оценить возможные октавные уровни шума в разных местах позволяют допустимые нормы в документах и некоторые данные в литературе [17, 37]. Шуму технических устройств частично посвящена работа [17, 20]. Эмпирические формулы для автотранспортного шума и его частотные характеристики присутствуют в [35]. При возможности произвести запись шума в требуемом месте, уровни в ОП и 1/3 ОП вычисляются при помощи Фурье-анализа.

Для постановки активных помех чаще всего применяются: белый шум, розовый шум со спадом 3 дБ/октава, коричневый шум со спадом 6 дБ/октава и помеха с огибающей спектра речи. Соотношения для расчета октавных уровней можно найти в [1].

В статье [42] представлены результаты анализа некоторых деталей модели АКУРИ и пример оценки защищенности речевой информации в конкретной ситуации.

Выводы

1. Предпринята попытка описать как можно более полную и связную, в масштабах статьи, математическую модель для оценки АКУРИ, ориентированную на применение в качестве ТСАР узконаправленных микрофонов.

2. Наибольшее внимание было уделено математическим моделям ТСАР и их недостаткам, а также наиболее удобным способам описания процессов излучения и распространения звука, которые широко применяются для инженерных расчетов.

3. Предложен простой способ учета близости источника при прослушивании при помощи узконаправленного микрофона.

4. Рекомендован принцип построения модели для оценки утечки речевой информации через открытое окно.

5. Обращено внимание на проблематику в области оценки разборчивости речи.

Список литературы: 1. Сагдеев К.М., Оленев А.А. Математическая модель акустического канала утечки речевой информации // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – №6. – С. 668 – 673. 2. *Акустическая экспертиза каналов речевой коммуникации* / Дидковский В. С., Дидковская М. В., Продеус А.Н. – Киев, 2008. – 420с. 3. Гавриленко А.В., Дидковский В.С., Продеус А.Н. Сравнительный анализ некоторых методов оценки разборчивости речи // *Акустический симпозиум «Консонанс-2007»*. Тези-

сы доклада, 25–27 июля 2007. – Киев, 2007. – С. 54 – 65. 4. Гавриленко О.В., Дидковский В.С., Продеус А.Н. Сопоставление версий формантного метода оценки разборчивости речи. // Электроника и связь, Тематический выпуск «Проблемы электроники», 2008. – Ч. 1. – С. 227 – 230. 5. Козлачков С.Б. Методические аспекты оценки защищенности речевой информации // Спецтехника и связь. – 2011. – №2. – С. 44-47. 6. Железняк В. К., Макаров Ю. К., Хорев А. А. Некоторые методические подходы к оценке эффективности защиты речевой информации // Специальная техника. – 2000. – № 4. – С. 39-45. 7. Бацула А.П., Иванов А.А., И.Л. Рева И.Л., Трушин В.А. О достоверности оценки защищенности речевой информации от утечки по техническим каналам // Доклады ТУСУРа, № 1 (21), часть 1, июнь 2010. 8. Трушин В.А., Рева И.Л., Иванов А.В. Усовершенствование методики оценки разборчивости речи в задачах защиты информации // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/2. С. 238-241. 9. Рева И.Л. Усовершенствованная методика оценки защищенности речевой информации от утечки по техническим каналам : автореф. ... канд. техн. наук. – Новосиб., 2012. – 16 с. 10. Олейников А.Н., Войтенко А.О. Сравнительная характеристика параметров узконаправленных микрофонов // Радиотехника. – 2013. – №173. – С. 224 – 231. 11. Шифрин Я.С. Антенны – ВИРТА им. Говорова Л.А., 1976. — 408 с. 12. Каторин Ю.Ф., Разумовский А.В., Спивак А.И. Защита информации техническими средствами : учеб. пособие ; под ред. Ю.Ф. Каторина – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 416 с. 13. Пудовкин А.П., Панасюк Ю.Н., Иванков А.А. Основы теории антенн : учеб. пособие ; под ред. Л.В. Комбаров. – Тамбов : ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 92 с. 14. Кубанов В.П. Излучение возбужденных поверхностей // ПГУТИ. – Киев, 2011. – 56 с. 15. Смаришев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. – Л. : Судостроение, 1973. – 27 с. 16. Юдин Е.Я., Борисов Л.А., Горенштейн И.В. Борьба с шумом на производстве ; под ред. Е.Я. Юдина. – М. : Машиностроение, 1985. – 393 с. 17. Иванов И.И. Инженерная акустика ; под ред. Л.Г. Осипова, В.Н. Бобылева. – М. : Логос, 2008. – 424 с. 18. Осипов Л.Г., Бобылев В.Н., Борисов Л.А. Звукоизоляция и звукопоглощение ; под ред. Л.Г. Осипова, В.Н. Бобылева. – М. : Астрель, 2004. – 405 с. 19. Фурдуев В.В. Электроакустика ; под ред. К.И. Велижаниной. – М. : ОГИЗ, 1948. – 514 с. 20. Справочник по технической акустике : пер. с нем. ; под ред. М. Хекла и Х.А. Мюллера. – Л. : Судостроение, 1980. – 440 с. 21. Справочник проектировщика. Защита от шума ; под ред. Е.Я. Юдина. – М. : Стройиздат, 1974 – 134 с. 22. Каргашин В.Л. Совершенствование методических принципов оценки защищенности помещений от утечки речевой информации // Специальная техника. – 2001. – № 6. – С. 11 – 21. 23. Звукоизоляция студий звукозаписи. Строительство. Акустическое проектирование [Электронный ресурс] / – Режим доступа: [www/ URL: http://www.audiostop.ru/wso/sound44.html](http://www.audiostop.ru/wso/sound44.html) – 10.06.2014 г. – Загл. с экрана. 24. ГОСТ 31296.2-2006. Межгосударственный стандарт. Шум. Описание, измерение и оценка шума на местности. Ч. 2. Определение уровней звукового давления. 25. Методические рекомендации по оценке необходимого снижения звука у населенных пунктов и определению требуемой акустической эффективности экранов с учетом звукопоглощения: Отраслевой дорожный методический документ. – М. : Росавтодор, 2003. 26. ТКП 45-2.04-127-2009 (02250) Конструкции зданий и сооружений. Правила проектирования звукоизоляции и звукопоглощения. 27. Проектирование защиты от транспортного шума и вибраций жилых и общественных зданий: пособие к МГСН 2.04-97 // Москомархитектура, 1999. 28. Боголепов И.И. Архитектурная акустика : учебник-справочник. – СПб. : ФБ СПбГТУ, 2001 – 223 с. 29. СП 23-103-2003 Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий: Свод правил по проектированию и строительству. – М., 2004. 30. Гошин Г.Г. Устройства СВЧ и антенны : учеб. пособие в 2-х ч. – Томск : Томск. межвуз. центр дистанционного образования, 2003. – Ч. 2: Антенны. – 130 с. 31. Хорев А.А. Оценка возможностей средств акустической (речевой) разведки // Специальная техника. – 2009. – №4. – С. 49-63. 32. Сапожков М.А. Электроакустика : учебник для вузов. – М. : Связь, 1978. – 272 с. 33. Абалмазов Э.И. Направленные микрофоны: мифы и реальность // Режим доступа: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=2&lvl=05.01.02>. – 13.05.2014. 34. СНиП 23-03-2003. Защита от шума. 35. ГОСТ 20444-85 Шум. Транспортные потоки. Методы измерения шумовой характеристики. 36. Хорев А.А. Технические каналы утечки акустической (речевой) информации // Специальная техника. – М., 2009. – №5. – С. 12 – 26. 37. Заборов В.И., М.И. Могилевский М.И., Мякишин В.Н. Справочник по защите от шума жилых и общественных зданий ; под ред. В.И. Заборова. – К. : Будивэльныйк, 1989. – 160 с. 38. Keith Attenborough, Kai Ming Li, Horoshenkov Kiril Predicting Outdoor Sound. – London and New York : Tailor & Francis Group, 2007. 39. Продеус А.Н. О некоторых особенностях развития объективных методов измерений разборчивости речи // Электроника и связь. Тематический выпуск "Электроника и нанотехнологии", 2010. – №2. – С.217 – 223. 40. Семенов Э. Электроакустические устройства : конспект лекций. Лекция 3. Распространение звуковых волн в пространстве и веществе // Режим доступа: <http://edwardsemyonov.narod.ru/3/lecture3.html> – 16.06.2014. 41. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. – Л. : Судостроение, 1972. – 352 с. 42. Олейников А.Н., Широкий О.М. Математическое моделирование акустического канала утечки речевой информации при применении узконаправленных микрофонов // Радиотехника. – 2014. – №177.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 21.03.2014