

УДК 681.224:621.391:006.354

МОДЕЛЬ КАНАЛА УТЕЧКИ РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Г.В. ДАВЫДОВ, Д.М. КАВАН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 3 января 2012

Представлена модель канала утечки речевой информации, образующаяся за счет акустического возбуждения большого числа мод изгибных колебаний, через ограждающие элементы конструкций помещений. Сформулированы условия обеспечения защиты речевой информации. Рассмотрены методы возбуждения маскирующих колебаний в ограждающих элементах конструкций.

Ключевые слова: модель канала утечки речевой информации, изгибные колебания, маскирующие колебания, ограждающие элементы конструкций, защита информации от утечки по акустическим каналам.

Введение

Защита речевой информации в выделенном помещении начинается с проведения исследований и оценок по возможности наличия акустических и вибрационных каналов утечки информации. Это обусловлено тем, что одно помещение не похоже на другое по своему оформлению и имеющемуся оборудованию, а также по виду и характеристикам возможных акустических каналов утечки речевой информации. Методика исследований основана на создании в защищаемом помещении акустических сигналов с уровнями звукового давления, создаваемого громкой речью в соответствующем частотном диапазоне, и измерении уровня акустических сигналов за пределами помещения в областях возможного перехвата информации.

Трудности реализации данной методики заключаются в необходимости контроля протяженных элементов ограждающих конструкций дискретно (в большом количестве точек) и составлении акустического портрета исследуемого элемента конструкций [1]. При этом существует вероятность того, что точки с максимальными уровнями акустических сигналов были пропущены из-за дискретного характера их выбора. Использование лазерного сканирующего виброметра PSV-400 фирмы Polytec позволяет получить вибрационную картину объекта, однако локализовать каналы утечки речевой информации через отверстия и трещины в ограждающих конструкциях не представляется возможным. Для исключения этого недостатка и повышения производительности предлагается проводить поиск источников акустических сигналов с максимальной амплитудой с использованием акустической антенной решетки.

Вместе с тем, в каждом конкретном случае приходится проводить ряд исследований с последующей статистической обработкой результатов экспериментов для оценки возможности образования акустического канала утечки речевой информации в выделенном помещении. При этом место расположения источника звука в защищаемом помещении, с помощью которого моделируют громкую речь, будет по-разному оказывать влияние на результаты измерений за пределами помещения. Это обусловлено различными углами падения звуковой волны на ограждающие конструкции и различными возбуждаемыми формами резонансных колебаний. Эти особенности образования акустических каналов утечки речевой информации будут рассмотрены в данной работе.

Физическая модель канала утечки речевой информации

Предложенная в работе [2] модель канала утечки речевой информации по существу является физической моделью, так как она описывает физические процессы, сопутствующие распространению речевой информации в виде акустических волн за пределы выделенного помещения. Там же рассмотрены механизмы образования акустических каналов утечки речевой информации и доказано, что основным видом колебаний, за счет которых происходит перенос речевой информации за пределы выделенного помещения, являются изгибные колебания ограждающих элементов конструкций.

Акустическое поле, образовавшееся за ограждающей конструкцией, будет неоднородным из-за суперпозиции волн от различных участков ограждающих конструкций, которые имеют различные амплитуды. При этом модель акустического поля за ограждающей конструкцией можно рассматривать как поверхность с пульсирующими областями для заданных частот форм собственных колебаний. В отдельных объемах за ограждающей конструкцией на определенных частотах будут наблюдаться максимумы звуковых давлений и одновременно в этих же объемах, но на других частотах, могут наблюдаться минимумы.

Математическая модель канала утечки речевой информации и ограждающих элементов конструкций

Для математического описания процесса распространения речевой информации за ограждающие элементы конструкций (стены, пол, потолок) в качестве расчетной модели предлагается использовать прямоугольную пластину.

Решение дифференциального уравнения в частных производных поперечных колебаний прямоугольной пластины в виде ряда представлено в работе [2]. Для случая свободно опертой пластины по всем краям или закрепленной шарнирно, граничные условия характеризуются тем, что смещения и изгибающие моменты на краях отсутствуют.

Определение частот форм собственных колебаний пластины для заданных граничных условий имеет вид:

$$p_{ij} = \pi^2 \left(\frac{i^2}{a^2} + \frac{j^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{mh}}, \quad (1)$$

где i – число форм ($i-1$ узловых линий) в направлении оси O_x ; j – число форм ($j-1$ узловых линий) в направлении оси O_y ; a – размер пластины по оси O_x ; b – размер пластины по оси O_y ; D – цилиндрическая жесткость пластины на изгиб, рассчитывается как

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\sigma^2)}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости; h – толщина пластины; σ – коэффициент Пуассона; m – плотность материала пластины; p – частота собственной формы колебаний пластины.

Для стены, выполненной из гипсовых блоков толщиной 0,09 м, длиной 6 м и высотой 3,2 м (модуль упругости равен $1,2 \cdot 10^{10}$ Н/м, плотность $2,3 \cdot 10^3$ кг/м³, коэффициент Пуассона равен 0,25) частоты собственных форм колебаний с первой по десятую включительно представлены в табл. 1.

Проведенные расчеты показывают, что частоты собственных форм колебаний гипсоблочной стены, с первой по десятую форму включительно по высоте и длине стены, включая и их комбинации, лежат в диапазоне от 70 Гц до 5000 Гц. На рис. 1 показано расположение частот собственных форм колебаний гипсоблочной стены по оси O_x и сверху представлен спектр русской речи.

Анализ представленных на одном рисунке результатов позволяет сопоставить спектр речевых сигналов, воздействующих на ограждающие элементы конструкций, и ряд собственных резонансных частот для ограждающих элементов конструкций (в примере на рис. 1 для гипсоблочной стены). Спектр речевых сигналов перекрывается набором ряда собственных форм резонансных частот для ограждающих элементов конструкций. В результате в ограж-

дающей конструкции возникают изгибные колебания с большими амплитудами на собственных формах резонансных колебаний. И, как результат, обратная сторона ограждающей конструкции вызывает возмущение окружающей среды на собственных формах резонансных колебаний, тем самым формируя акустическую волну с речевой информацией. Таким образом, ограждающие конструкции можно характеризовать как фильтр, пропускающий сигналы с частотами, равными собственным резонансным частотам изгибных колебаний ограждающих конструкций.

Таблица 1. Частоты собственных форм колебаний гипсоблочной стены

$\begin{matrix} j \\ i \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	77,3	256,7	555,7	974,3	1512,5	2170,4	2947,8	3844,8	4861,4	5997,7
2	129,9	309,3	608,3	1027,0	1565,2	2223,0	3000,4	3897,4	4914,1	6050,3
3	217,7	397,1	696,1	1114,7	1652,9	2310,7	3088,1	3985,2	5001,8	6138,0
4	340,5	519,9	818,9	1237,5	1775,7	2433,5	3211,0	4108,0	5124,6	6260,8
5	498,4	677,8	976,8	1395,4	1933,6	2591,5	3368,9	4265,9	5282,5	6418,8
6	691,4	870,8	1169,8	1588,4	2126,6	2784,5	3561,9	4458,9	5475,5	6611,8
7	919,5	1098,9	1397,9	1816,5	2354,7	3012,6	3790,0	4687,0	5703,6	6839,9
8	1182,7	1362,1	1661,1	2079,7	2617,9	3275,8	4053,2	4950,2	5966,8	7103,1
9	1481,0	1660,4	1959,4	2378,0	2916,2	3574,0	4351,5	5248,5	6265,1	7401,3
10	1814,3	1993,8	2292,8	2711,4	3249	3907,4	4684,8	5581,9	6598,5	7734,7

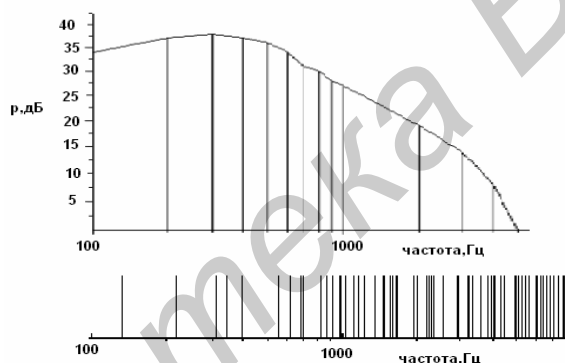


Рис. 1. Расположение частот собственных форм колебаний гипсоблочной стены и спектр русской речи

Для стены, выполненной из железобетонных плит толщиной 0,25 м, длиной 6 м и высотой 2,8 м, частоты собственных форм колебаний с первой по десятую включительно представлены в табл. 2.

Таблица 2. Частоты собственных форм колебаний железобетонной стены

$\begin{matrix} j \\ i \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	410	1422	3109	5471	8507	12219	16605	21665	27401	33811
2	631	1643	3330	5691	8728	12439	16825	21886	27621	34031
3	998	2010	3697	6059	9095	12806	17192	22253	27988	34399
4	1512	2525	4211	6573	9673	13321	17707	22767	28503	34913
5	2174	3186	4873	7234	10271	13982	18368	23429	29164	35574
6	2982	3994	5681	8043	11079	14790	19176	24237	29972	36382
7	3937	4949	6636	8998	12034	15745	20131	25192	30927	37338
8	5039	6051	7738	10100	13136	16847	21233	26294	32030	38440
9	6288	7300	8987	11349	14385	18097	22482	27543	33279	39689
10	7684	8696	10383	12745	15781	19493	23878	28939	34675	41085

Представленные в табл. 2 частоты собственных форм колебаний железобетонной стены выполнены без учета влияния арматуры. В некоторой степени влияние арматуры учитывалось через повышение модуля упругости по сравнению с бетоном.

Учесть влияние видов закрепления, а также арматуры и вырезов в железобетонной стене, можно, используя метод конечных элементов при расчетах [3], который представляет собой обобщение метода Релея-Ритца-Галеркина численного решения дифференциальных уравнений в частных производных. Хотя в методе Ритца не решаются непосредственно дифференциальные уравнения, а используется вариационная формулировка задачи и решение ищется в виде комбинаций $\sum q_i \varphi_i$, где q_i – весовые коэффициенты; φ_i – пробные полиномиальные функции небольшой степени. Весовые коэффициенты q_i вычисляются из вариационного принципа. В методе конечных элементов пробные полиномиальные функции φ_i равны нулю на большей части области и отличны от нуля в окрестности одного узла и составлены из полиномов не большой степени (третьей или четвертой). В методе Ритца для повышения точности расчетов используются более сложные пробные функции. Для повышения точности расчетов в методе конечных элементов применяется более мелкое разбиение области на конечные элементы с использованием тех же полиномов, что и на более крупной сетке. Выбор вида конечного элемента в большей степени определяется формой границ. Для криволинейных границ области разбиения проще использовать треугольные элементы. Использование прямоугольных элементов предпочтительнее для объемных тел с простой геометрией, близкой к параллелепипеду [3]. В этом случае число конечных элементов будет меньше, так как один куб занимает тот же объем, что и 6 тетраэдров. Разбиение на расчетную сетку для гипсоблочной стены было выполнено на конечные элементы с прямоугольными сторонами и 6 гранями, как показано на рис. 2. Сетка конечных элементов создана путем упорядоченного разбиения на шестигранные элементы одинаковых размеров.

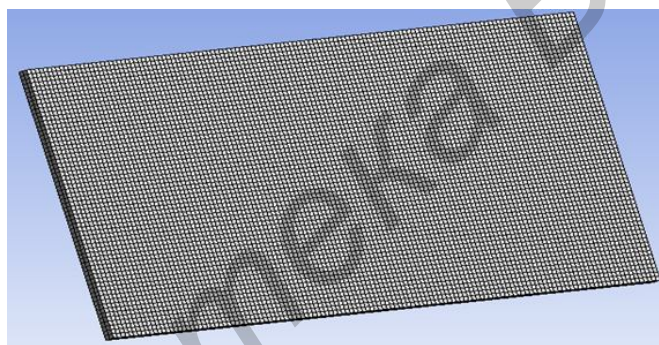


Рис. 2. Модель гипсоблочной стены, разбитой на шестигранные конечные элементы

Конечный элемент в виде параллелепипеда имеет восемь узловых точек. Вектор-столбец перемещений для конечного элемента имеет 8 векторов или 24 компоненты, так как каждый из векторов описывается тремя компонентами. Для i -го конечного элемента вектор-столбец перемещений

$$\{q\}_i = \{\{q\}_i^1, \dots, \{q\}_i^4, \dots, \{q\}_i^8\}, \quad (3)$$

где $\{q\}_i^k = \{q_{ix}^k, q_{iy}^k, q_{iz}^k\} = \{u_i^k, v_i^k, w_i^k\}$ или u_i^k – перемещения по оси x k -того узла i -того конечного элемента, v_i^k – перемещения по оси y k -того узла i -того конечного элемента, w_i^k – перемещения по оси z k -го узла i -го конечного элемента. При этом должно выполняться условие равенства перемещений в узлах взаимодействующих элементов перемещениям этого узла.

Вектор узловых сил для i -го конечного элемента представляет также вектор столбец

$$\{F\}_i = \{\{F\}_i^1, \dots, \{F\}_i^4, \dots, \{F\}_i^8\}, \quad (4)$$

где $\{F\}_i^k = \{F_{ix}^k, F_{iy}^k, F_{iz}^k\}$ или F_{ix}^k – сила для k -того узла i -того конечного элемента по оси x , F_{iy}^k – сила для k -го узла i -го конечного элемента по оси y , F_{iz}^k – сила для k -го узла i -го конечного элемента по оси z . Для соприкасающихся элементов в одном узле должно выполняться условие равновесия внутренних и внешних (если они имеются) сил для этого узла. Это условие должно выполняться для всех узлов модели конечных элементов.

Переход от узловых перемещений к перемещениям, деформациям и напряжениям внутри конечных элементов осуществляется путем задания интерполяционных функций, которые должны обеспечить неразрывность перемещений при переходе от одного конечного элемента к другому.

Матрица жесткости, характеризующая связь между вектором-столбцом перемещений и вектором-столбцом сил для i -го конечного элемента, имеет вид

$$[K]_i = \begin{bmatrix} [K]_{i1}^1 & \dots & [K]_{i1}^4 & \dots & [K]_{i1}^8 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ [K]_{i4}^1 & \dots & [K]_{i4}^4 & \dots & [K]_{i4}^8 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ [K]_{i8}^1 & \dots & [K]_{i8}^4 & \dots & [K]_{i8}^8 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $[K]_{il}^k$ определяет реакции в l -м узле от единичных перемещений в k -м узле i -го элемента. Матрица $[K]_i$ характеризует реактивные усилия в узлах по заданным направлениям, отвечающие единичным узловым перемещениям, последовательно накладываемым по этим направлениям, при условии, что остальные перемещения в узлах элемента равны нулю [4].

Между векторами $\{F\}_i$ и $\{q\}_i$ имеется однозначное соответствие

$$\{F\}_i = [K]_i \{q\}_i, \quad (6)$$

где $[K]_i$ – матрица жесткости i -го элемента.

Матрица интерполяционных функций для параллелепипеда имеет восемь блоков

$$[C] = [[C]^{(1)} \dots [C]^{(4)} \dots [C]^{(8)}], \quad (7)$$

где $[C]^{(k)} = E_3 C_k(x, y, z)$, E_3 – единичная матрица третьего порядка.

Перемещения внутри элемента u , v , w можно описать с помощью полиномов, которые обеспечивают непрерывность при переходе от одного элемента к другому:

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= \alpha_1 + \alpha_4 x + \alpha_7 y + \alpha_{10} z + \alpha_{13} xy + \alpha_{16} yz + \alpha_{19} xz + \alpha_{22} xyz; \\ v(x, y, z) &= \alpha_2 + \alpha_5 x + \alpha_8 y + \alpha_{11} z + \alpha_{14} xy + \alpha_{17} yz + \alpha_{20} xz + \alpha_{23} xyz; \\ w(x, y, z) &= \alpha_3 + \alpha_6 x + \alpha_9 y + \alpha_{12} z + \alpha_{15} xy + \alpha_{18} yz + \alpha_{21} xz + \alpha_{24} xyz. \end{aligned} \quad (8)$$

Интерполяционные функции $C_k(x, y, z)$ с учетом зависимостей можно записать в виде:

$$\begin{Bmatrix} C_1(x, y, z) \\ C_2(x, y, z) \\ C_3(x, y, z) \\ C_4(x, y, z) \\ C_5(x, y, z) \\ C_6(x, y, z) \\ C_7(x, y, z) \\ C_8(x, y, z) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & y_6 & y_7 & y_8 & y \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 & z_6 & z_7 & z_8 & z \\ x_1 y_1 & x_2 y_2 & x_3 y_3 & x_4 y_4 & x_5 y_5 & x_6 y_6 & x_7 y_7 & x_8 y_8 & xy \\ y_1 z_1 & y_2 z_2 & y_3 z_3 & y_4 z_4 & y_5 z_5 & y_6 z_6 & y_7 z_7 & y_8 z_8 & yz \\ x_1 z_1 & x_2 z_2 & x_3 z_3 & x_4 z_4 & x_5 z_5 & x_6 z_6 & x_7 z_7 & x_8 z_8 & xz \\ x_1 y_1 z_1 & x_2 y_2 z_2 & x_3 y_3 z_3 & x_4 y_4 z_4 & x_5 y_5 z_5 & x_6 y_6 z_6 & x_7 y_7 z_7 & x_8 y_8 z_8 & xyz \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ x \\ y \\ z \\ xy \\ yz \\ xz \\ xyz \end{Bmatrix}$$

Граничные условия для расчетной модели при жестком закреплении характеризуются равенством нулю перемещений по выбранной грани и нулю поворотов, а для шарнирного закреплении предполагается равенство нулю как перемещений, так и изгибающих моментов по выбранным граням. В качестве примера были выполнены расчеты форм собственных колебаний

гипсоблочной стены с использованием программного пакета ANSYS. Результаты расчетов представлены на рис. 3 и 4.

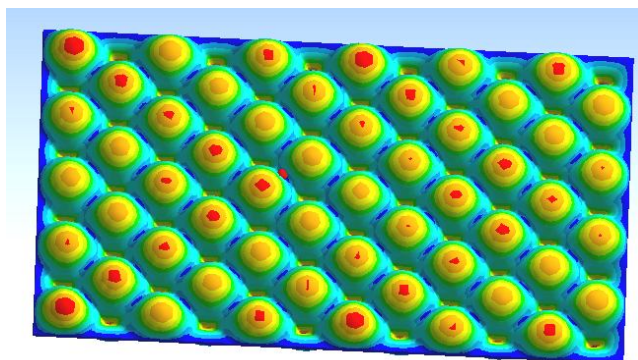


Рис. 3. Форма 9×6 собственных колебаний гипсоблочной стены при закреплении по торцам с нулевыми смещениями по нормали



Рис. 4. Значения частот собственных колебаний гипсоблочной стены при закреплении по торцам с нулевыми смещениями по нормали

Заключение

Показано, что речевые сигналы, представленные в виде акустических волн, проходят через ограждающие элементы конструкций помещений за счет возбуждения многомодовых изгибных колебаний ограждающих конструкций.

MODEL OF SPEECH INFORMATION LEAKEGE CHANNEL

H.V. DAVYDAU, D.M. KAVAN

Abstract

The model of the channel leakage of speech information, which is formed by the acoustic excitation of a large number of modes of flexural vibrations through the building envelope construction elements, is presented. Conditions are formulated to protect speech information. The methods of masking the excitation of oscillations in the envelope structural elements are discussed.

Список литературы

1. Давыдов Г.В., Каван Д.М., Попов В.А. и др. // Докл. БГУИР. 2009. №4. С. 76–78.
2. Бабаков И.М. Теория колебаний. М., 1968.
3. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М., 1977.
4. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. Запорожье, 2009.