

ОЦЕНКА АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЯ ОКОННОГО СТЕКЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

В.И. ЗАБОЛОТНЫЙ, Ю.А. КОВАЛЬЧУК

Данная работа направлена на исследование канала утечки речевой информации из помещения в случае использования лазерной системы акустической разведки (ЛСАР). Исследование заключается в построении и анализе соответствующей качественной модели, которая позволит создать совокупность отдельных количественных моделей. Это даст возможность оценить возможный канал утечки речевой информации и принять соответствующие меры относительно ее защиты.

The paper is devoted to research of a linguistic information leakage channel from premises in case of using laser systems of acoustic reconnaissance (LSAR). The research consists in building and analyzing corresponding quality models, which will allow to create an aggregate of separate quantitative models. This will enable to estimate a possible channel of linguistic information leakage and take proper measures for its protection.

ВСТУПЛЕНИЕ

Техническая защита речевой информации занимает важное место в комплексной защите информации. Это обусловлено тем, что часто возникает необходимость обеспечения защиты речевой информации внутри помещения от возможной утечки.

Использование лазерной системы акустической разведки (ЛСАР), так называемых „лазерных микрофонов“, является одной из угроз утечки речевой информации из помещения. Благодаря лазерно-локационному зондированию оконных стекол и другой отбивающей поверхности они позволяют воспроизводить речь, любые другие звуки и акустические шумы в помещении.

1. ОБЩАЯ МОДЕЛЬ КАНАЛА УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ В СЛУЧАЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ «ЛАЗЕРНОГО МИКРОФОНА»

Источником утечки информации является обычное оконное стекло, которое является своеобразной мембраной, колеблющейся со звуковой частотой под давлением акустических волн, создавая фонограмму разговора. Излучение, которое генерируется лазерным передатчиком, распространяется в атмосфере и, отражаясь от поверхности оконного стекла, модулируется акустическим сигналом. Это отраженное излучение потом воспринимается фотоприемником (детектором), который и восстанавливает речевую информацию в помещении.

Чаще всего на практике используются „лазерные микрофоны“ с совмещенными лазером и детектором (рис.1) [1].

В состав таких ЛСАР входит сплиттер (делитель) пучка, который позволяет свести падающий и отраженный луч в одну точку, что обеспечивает возможность совмещения лазера и детектора. Использование интерферометрии позволяет увеличить чувствительность «лазерного микрофона» при условии, если отраженные лучи приходят когерентными по фазе.

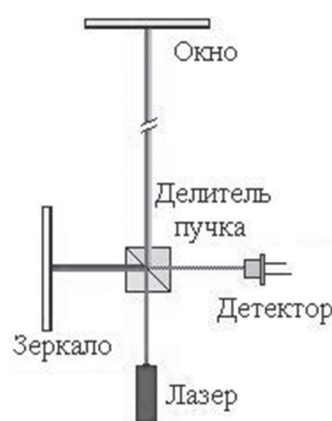


Рис. 1. Схема «лазерного микрофона» с совмещенными лазером и детектором

Длина волны лазера может находиться между видимым и инфракрасным излучением. Современные лазеры работают на частоте приблизительно $3 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{14}$ Гц.

2. МОДЕЛЬ ЗАКРЕПЛЕНИЯ СТЕКЛА В РАМЕ

Полезно рассмотреть три способа закрепления стекла в раме, каждому из которых отвечает особый вид колебания [1].

В раме закрепление пластины (рис. 2) может быть:

- шарнирное s , когда кромка пластины под действием звукового давления может осуществлять вращательное движение вдоль внутренних границ рамы, что возможно при условии закрепления только краёв пластины;
- зажатое (жесткое) j , когда в раме стекло может только сгибаться, вращение вдоль кромки отсутствует;
- люфтовое l , которое заключается в возможности перемещения пластины поперёк кромки закрепления без изгиба вблизи креплений.

Все эти три варианта могут иметь место на практике. От конструкции крепления пластины стекла к раме зависит степень проявления каждого из вариантов.

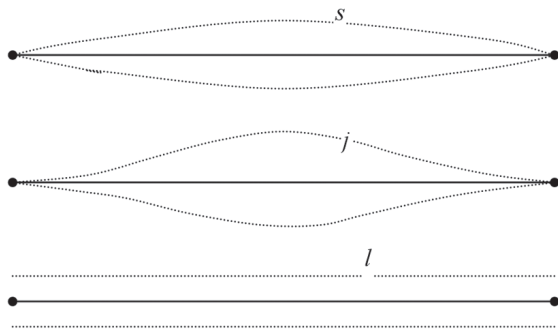


Рис. 2. Виды колебания оконного стекла

3. МОЩНОСТЬ ПРИНЯТОГО СИГНАЛА

Мощность сигнала, принятого на вход фотоприёмника после его отражения от оконного стекла, определяется следующим образом (1) [3]:

$$P = \Pi S_A k S_0 / R^2, \quad S_0 = S k_{\text{ц}} \xi, \quad (1)$$

где S_A — площадь поверхности объектива приёмного оптического устройства; S — коэффициент пропорциональности, который количественно характеризует свойства стекла касательно рассеивания лазерного излучения; ξ — коэффициент деполаризации лазерного излучения во время отражения от стекла; $k_{\text{ц}}$ — коэффициент направленного действия стекла, который характеризует степень концентрации мощности лазерного излучения, рассеиваемого стеклом в направлении «лазерного микрофона»; Π — плотность потока мощности лазерного излучения стекла; k — коэффициент пропускания (прозрачности) приемной оптической системы; R — расстояние от «лазерного микрофона» к оконному стеклу; S_0 — эффективная площадь рассеивания (ЭПР) стекла. ЭПР в оптическом диапазоне волн, как и в СВЧ диапазоне, количественно характеризует свойства предметов (в нашем случае стекла) касательно рассеивания и отражения излучения.

4. ОСОБЕННОСТЬ РАБОТЫ ФОТОДЕТЕКТОРА

Необходимо отметить, что фотодетектирование в оптическом диапазоне волн является квантомеханическим процессом. Обычно на выходе фотодетектора наблюдают поток одноэлектронных импульсов, моменты появления которых отвечают вылету фотоэлектронов из фотокатода, которые выпускаются во время воздействия на фотокатод приемника узкополосного оптического сигнала (лазерное отражённое излучение или тепловое излучение после оптического фильтра) с определенной мгновенной интенсивностью.

Падающий световой поток превращается в поток фотоэлектронных импульсов фототока (напряжения), который необходимо зарегистрировать. В результате случайного характера времени появления фотоэлектронных (одноэлектронных) импульсов t_i и случайного их числа n на каждом подынтервале наблюдения

$(t, t+T)$ фототок является флуктуационным процессом $\xi(t)$, который можно представить следующей математической моделью (2) [3]:

$$\xi(t) = \sum_{i=1}^n a_i F(t-t_i), \quad (2)$$

где a_i — амплитуда одноэлектронного импульса; $F(t)$ — функция, которая описывает форму одноэлектронного импульса.

Наиболее распространенным фотонным (квантовым) детектором, предназначенным для приёма слабых оптических сигналов на квантовом уровне, есть фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), который имеет высокий уровень чувствительности.

На выходе ФЭУ ток (напряжение) имеет импульсный характер тогда, когда интенсивность светового потока мала, а соответственно и мала скорость фотоотсчётов.

В случае увеличения интенсивности светового потока флуктуационный процесс реализуется как суперпозиция элементарных импульсов, причём, чем больше интенсивность и длительность одноэлектронных импульсов, тем меньше выражен импульсный характер процесса.

Следовательно, в зависимости от интенсивности потока фотоэлектронов, который принимается, импульсный поток на выходе ФЭУ может представлять собой или редкую последовательность разделённых (неналоженных друг на друга) импульсов, которую не трудно подсчитать, или неразделённых (наложенных друг на друга) импульсов, которые подсчитать уже невозможно.

Средняя плотность импульсного потока в первом случае мала. Во время приема таких сигналов фотодетектор может регистрировать отдельные фотоэлектроны, то есть работать в режиме счёта фотонов. Такой режим не имеет аналогов в радиолокации.

В этом способе регистрации измеряемым параметром случайного импульсного потока есть число импульсов n , что наблюдаются в интервале времени от t к $t+T$. Этот режим эффективен во время приёма слабых оптических сигналов.

На практике указанная задача решается с помощью дискретных (цифровых) устройств, потому этот способ регистрации называют дискретным.

Плотность импульсного потока во втором случае большая и фотоэлектрический сигнал на выходе ФЭУ имеет непрерывный характер. Этот режим имеет место в случае сильного потока фотоэлектронов, когда может быть воспроизведена огибающая оптического сигнала.

В этом способе регистрации параметром, который измеряется, есть аналоговая величина фототока на выходе фотодетектора. Для регистрации исходного сигнала из фотодетектора используют аналоговые устройства. Поэтому данный способ регистрации называют аналоговым.

В случае использования „лазерного микрофона” необходимо учитывать, что дождь, снег и туман могут существенно повлиять на отраженный сигнал, ослабляя его за счёт рассеивания.

5. МОДЕЛЬ КОЛЕБАНИЯ ОКОННОГО СТЕКЛА

Чтобы разработать эффективную защиту от подслушивания в случае использования «лазерного микрофона», необходимо смоделировать колебания оконных стёкол, которые являют собой прямоугольную мембрану, закреплённую по краям.

Дифференциальное уравнение малых колебаний плоской однородной мембраны имеет вид (3):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{Z(x_1, x_2, t)}{T}, \quad c^2 = \frac{T}{\rho}, \quad (3)$$

где u — сдвиг мембраны от положения равновесия, $Z(x_1, x_2, t)$ — давление внешней силы на мембрану, T — сила противодействия отклонению мембраны от положения равновесия, ρ — поверхностная плотность мембраны. Плоскость, в которой лежит мембрана в положении равновесия, предусматривается совпадающей с плоскостью x_1, x_2 . Выбрав начало координат в вершине одного из углов мембраны и направив оси x_1 и x_2 вдоль выходящих из этой вершины сторон, запишем предельные условия в виде (4):

$$u|_{x_1=a} = u|_{x_1=0} = u|_{x_2=b} = u|_{x_2=0} = 0, \quad (4)$$

где a и b — длины сторон мембраны. Начальные условия примем в общей форме (5):

$$u|_{t=0} = u_0(x_1, x_2), \quad \frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = u_1(x_1, x_2). \quad (5)$$

Нам нужно найти решение задачи (3) — (5) в прямоугольнике (6):

$$0 \leq x_1 \leq a, \quad 0 \leq x_2 \leq b. \quad (6)$$

Путем двукратного применения интегрального преобразования задачу (3) — (5) можно привести к задаче для обычного дифференциального уравнения (7):

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial t^2} + (\lambda_\gamma^2 + \mu_\eta^2) \tilde{u} = \frac{\tilde{Z}(\gamma, \eta, t)}{T}. \quad (7)$$

Для нахождения решения этого уравнения запишем уравнение (7) в виде (8):

$$\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial t^2} + c^2 \pi^2 \left(\frac{\gamma^2}{a^2} + \frac{\eta^2}{b^2} \right) \tilde{u} = \frac{c^2}{T} \tilde{Z}(\gamma, \eta, t). \quad (8)$$

Для краткости записи введём обозначения (9):

$$\beta_{\gamma, \eta} = \pi \sqrt{\frac{\gamma^2}{a^2} + \frac{\eta^2}{b^2}}, \quad (9)$$

$$\tilde{f}(\gamma, \eta, t) = \frac{c^2}{T} \tilde{Z}(\gamma, \eta, t).$$

Каждой паре номеров γ, η уравнения (8) отвечает свое решение, которое мы обозначим через $\tilde{u}(\gamma, \eta, t)$. Тогда мы получим выражение (10):

$$\frac{\partial^2 \tilde{u}_{\gamma, \eta}(t)}{\partial t^2} + \beta_{\gamma, \eta}^2 c^2 \tilde{u}_{\gamma, \eta}(t) = \tilde{f}(\gamma, \eta, t). \quad (10)$$

Общее решение неоднородного дифференциального уравнения (10) $\tilde{u}_{\gamma, \eta}(t)$ записывается как сумма общего решения соответствующего однородного уравнения и отдельного решения этого неоднородного уравнения (11), (12):

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{\gamma, \eta}(t) = & \tilde{u}_0(\gamma, \eta) \cos \beta_{\gamma, \eta} c t + \\ & + \frac{\tilde{u}_1(\gamma, \eta)}{\beta_{\gamma, \eta} c} \sin \beta_{\gamma, \eta} c t + \\ & + \frac{\sin \beta_{\gamma, \eta} c t}{\beta_{\gamma, \eta} c} \int \cos \beta_{\gamma, \eta} c t \cdot \tilde{f}(\gamma, \eta, t) dt - \\ & - \frac{\cos \beta_{\gamma, \eta} c t}{\beta_{\gamma, \eta} c} \int \sin \beta_{\gamma, \eta} c t \cdot \tilde{f}(\gamma, \eta, t) dt, \end{aligned} \quad (11)$$

или

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{\gamma, \eta}(t) = & \frac{1}{\beta_{\gamma, \eta} c} (\cos \beta_{\gamma, \eta} c t (\beta_{\gamma, \eta} c \tilde{u}_0(\gamma, \eta) - \\ & - \int \sin \beta_{\gamma, \eta} c t \cdot \tilde{f}(\gamma, \eta, t) dt) + \\ & + \sin \beta_{\gamma, \eta} c t \tilde{u}_1(\gamma, \eta) + \\ & + \int \cos \beta_{\gamma, \eta} c t \cdot \tilde{f}(\gamma, \eta, t) dt). \end{aligned} \quad (12)$$

Осуществив двукратное обратное преобразование, получим решение начальной задачи (3) — (5) в виде (13):

$$\begin{aligned} u(x_1, x_2, t) = & \sum_{\gamma=1}^{\infty} \bar{u}_\gamma(x_2, t) \bar{K}_\gamma(x_1) = \\ = & \sum_{\gamma, \eta=1}^{\infty} \tilde{u}_{\gamma, \eta}(t) \bar{K}_\gamma(x_1) \tilde{K}_\eta(x_2) = \\ = & \sum_{\gamma, \eta=1}^{\infty} \tilde{u}_{\gamma, \eta}(t) \sin \frac{\pi}{a} \gamma x_1 \sin \frac{\pi}{b} \eta x_2. \end{aligned} \quad (13)$$

То есть

$$\begin{aligned} u(x_1, x_2, t) = & \sum_{\gamma, \eta=1}^{\infty} \left(\cos \beta_{\gamma, \eta} c t (\beta_{\gamma, \eta} c \tilde{u}_0(\gamma, \eta) - \right. \\ & - \int \sin \beta_{\gamma, \eta} c t \cdot \tilde{f}(\gamma, \eta, t) dt) + \sin \beta_{\gamma, \eta} c t (\tilde{u}_1(\gamma, \eta) + \\ & + \int \cos \beta_{\gamma, \eta} c t \cdot \tilde{f}(\gamma, \eta, t) dt) \left. \right) \frac{\sin \frac{\pi}{a} \gamma x_1 \sin \frac{\pi}{b} \eta x_2}{\beta_{\gamma, \eta} c}. \end{aligned} \quad (14)$$

Уравнение (14) позволяет определить амплитуду отклонения произвольной точки оконного стекла окна под действием акустической волны в любой момент времени.

6. ОЦЕНКА АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЯ ОКОННОГО СТЕКЛА

Для того, чтобы разработать эффективную защиту речевой информации в помещении при условии использования «лазерного микрофона»,

обычно важно хотя бы приблизительно оценить амплитуду колебания оконного стекла под действием акустической волны. Рассмотрим для этого отдельную модель колебания оконного стекла (рис. 3):

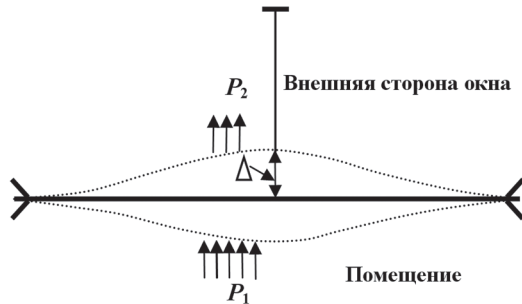


Рис. 3. Модель отражающей поверхности с зажатым креплением

В этой модели P_1 — это звуковое давление перед стеклом (в помещении), P_2 — звуковое давление за стеклом, Δ — амплитуда колебания оконного стекла.

Известно, что

$$P = vrc, \quad (15)$$

где P — давление звуковой волны, v — скорость движения молекулы воздуха под воздействием звуковой волны, r — плотность атмосферы, c — скорость распространения звуковой волны в атмосфере.

В любой момент времени давление звуковой волны можно определить следующим образом (16):

$$P(t) = v(t)rc. \quad (16)$$

Также в большинстве случаев (для гармонического колебания) давление звуковой волны в любой момент времени можно определить с помощью выражения (17):

$$P(t) = P \sin 2\pi ft, \quad (17)$$

где f — частота гармонического колебания акустической волны.

Эти два последних уравнений позволяют в любой момент времени определить скорость движения молекул оконного стекла под воздействием звуковой волны, которая фактически совпадает со скоростью движения молекул воздуха за оконным стеклом $v_2(t)$ (18):

$$v_2(t) = \frac{P_2 \sin 2\pi ft}{rc}. \quad (18)$$

Амплитуда колебания оконного стекла $\Delta(t)$ фактически является интегралом от вышеупомянутой скорости движения молекул этого оконного стекла (19):

$$\begin{aligned} \Delta(t) &= \int v_2(t) dt = \int \frac{P_2 \sin 2\pi ft}{rc} dt = \\ &= -\frac{P_2}{2\pi frc} \cos 2\pi ft. \end{aligned} \quad (19)$$

Отсюда можно определить максимальную амплитуду колебания оконного стекла Δ для заданной звуковой частоты f и звукового давления за стеклом P_2 (20):

$$\Delta = \frac{P_2}{2\pi frc}. \quad (20)$$

Для нормальных атмосферных условий $rc = 420 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^3$. Остается определить звуковое давление за стеклом P_2 . Для этого необходимо воспользоваться формулой для расчета звукоизоляции окна (21):

$$R = 10 \lg(P_1 / P_2)^2. \quad (21)$$

Отсюда

$$P_2 = \frac{P_1}{10^{R/20}}. \quad (22)$$

Следовательно, максимальную амплитуду колебания оконного стекла Δ для заданной звуковой частоты f и звукового давления за стеклом P_2 при известном значении звукоизоляции окна можно определить по формуле (23):

$$\Delta = \frac{P_1}{2\pi frc \cdot 10^{R/20}}. \quad (23)$$

Проведем приблизительную оценку амплитуды колебания оконного стекла в различных условиях.

Звуковое давление в помещении от человеческой речи P_1 составляет от 0,2 Па до 1 Па, достаточный диапазон частоты f во время разговора находится в пределах от 150 Гц до 5 кГц. Значение звукоизоляции современного евро окна приблизительно равняется 40 дБ.

Несложные расчеты позволят нам получить следующие результаты.

Если в помещении происходит тихий разговор ($P_1 = 0,2 \text{ Па}$), то в случае высокой тембрации человеческого голоса, например женского ($f = 5 \text{ кГц}$), максимальная амплитуда колебания оконного стекла Δ будет равна приблизительно 0,2 нм, а в случае низкой тембрации человеческого голоса, например мужского баса ($f = 150 \text{ Гц}$), амплитуда будет равна приблизительно 5 нм.

Если же в помещении громко разговаривают ($P_1 = 1 \text{ Па}$), то в случае высокой тембрации голоса ($f = 5 \text{ кГц}$), максимальная амплитуда колебания оконного стекла Δ будет равна приблизительно 1 нм, а в случае низкой тембрации голоса ($f = 150 \text{ Гц}$), амплитуда будет равна приблизительно 25 нм.

Следовательно, по результатам подсчетов амплитуда колебаний стекла под действием акустической волны в среднем находится в пределах от долей нанометра до 25 нм.

Чаще всего используют лазеры с длинами волн 0,1–0,9 мкм, невидимыми для человеческого глаза.

Длины волн лазера на порядок выше, чем амплитуда колебания оконного стекла, то есть за

счет колебательного движения элементов поверхности оконного стекла под действием акустической волны в результате человеческого разговора происходит только сдвиг фазы отраженного лазерного сигнала относительно опорного. Это с одной стороны упрощает задачу подслушивания разговоров в помещении, так как в этом случае во время детектирования сигнала неоднозначность отсутствует, а с другой стороны усложняет эту задачу, так как в этом случае сдвиг фазы отраженного сигнала будет небольшим и нужен очень чувствительный фотодетектор. Все это даёт возможность сделать вывод о том, что данное устройство может применяться в реальных условиях и существует необходимость в разработке соответствующих мероприятий по защите от него.

ВЫВОДЫ

Итак, в данной статье были рассмотрены качественные и количественные модели канала утечки речевой информации в случае использования «лазерного микрофона». Также была предложена оценка амплитуды колебания оконного стекла под действием акустической волны. Всё это дает возможность оценить возможный канал утечки речевой информации и принять соответствующие меры относительно ее защиты от подслушивания.

Литература.

- [1] *Заболотный В.И.* Модель отражающей поверхности лазерного канала разведки информации / В.И. Заболотный, Ю.А. Ковальчук // Прикладная радиоэлектроника. — 2007. — Т. 6. №3. — С. 432-434.
- [2] *Григорук В.И.* Лазерная физика: уч. пособие / В.И. Григорук, П.А. Коротков, А.И. Хижняк. МОП Украины. — К.: МП «Леся», 1997. — 480 с.
- [3] *Малашин М.С.* Основы проектирования лазерных локационных систем : учеб. пособие / М.С. Малашин, Р.П. Каминский, Ю.Б. Борисов. — М.: «Высшая школа», 1983. — 207 с.

Поступила в редколлегию 29.05.2009



Заболотный Владимир Ильич, доцент кафедры БИТ ХНУРЕ. Область научных интересов: техническая защита информации.



Ковальчук Юрий Алексеевич, аспирант кафедры БИТ ХНУРЕ. Область научных интересов: техническая защита информации.