

УДК 621.391.6:519.72

**ОЦЕНКА МОДЕЛИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КАНАЛА  
УТЕЧКИ РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ****д-р техн. наук, проф. В.К. ЖЕЛЕЗНЯК, И.С. ЧЕРНОВА**  
(Полоцкий государственный университет)

*Проанализирован оптико-электронный канал утечки речевой информации. Обоснован выбор измерительного сигнала на основе рассмотренных преимуществ квадратурного гармонического сигнала. Предложен метод обработки измерительного сигнала, включающий оценку суммарного эффекта амплитудной и фазовой модуляций. Рассмотрены различные виды методов обработки сигнала, выбран метод, факторы, влияющие на методическую (теоретическую) погрешность (точность) оценки разборчивости речи. Акустические колебания твердой среды, подвергающиеся амплитудно-фазовой модуляции, представлены моделью колеблющейся прямоугольной мембраны. Предложена методика оценивания отношения сигнал/шум с помощью разработанной математической модели оценки защищенности. Построена плотность распределения фазы при различных энергетических показателях, показывающая степень зависимости фаз результирующего колебания от исходного сигнала.*

**Введение.** Защита акустической (речевой) информации является одной из важнейших задач в общем комплексе мероприятий по обеспечению информационной безопасности объекта информатизации и осуществляется пассивными и активными методами. Учитывая особенности расположения большинства объектов информатизации, задачи защиты конфиденциальных переговоров особо актуальны. Создано большое количество различных систем активной маскировки, используемых для защиты от средств перехвата речевой информации.

Речевой сигнал – сложный акустический сигнал, включающий гармонические и шумовые составляющие, поэтому важно обосновать выбор измерительного сигнала. Под действием акустических колебаний речевого источника в ограждающих строительных конструкциях и инженерных коммуникациях помещения возникают вибрационные колебания.

В зависимости от среды распространения речевых сигналов и способов их перехвата технические (параметрические) каналы утечки информации разделяют на акустические, виброакустические, электроакустические, оптико-электронные.

Резкое возрастание объемов передаваемой информации обусловило необходимость освоения оптического диапазона и на его основе развития оптико-электронных систем обработки информации.

Развитие оптических систем, основным задачам которых являются фокусировка для концентрации излучения, коллимация для формирования пучка с малым углом расходимости, согласование параметров оптического пучка с параметрами оптической системы, стало возможным благодаря изучению свойств источника сигнала (монохроматичность, острая направленность, когерентность, поляризованность).

Критериями оценки защищенности речевой информации являются [1]:

- информационный показатель (нормируемая величина разборчивости речи);
- энергетический показатель (величина отношения мощности сигнала к мощности шума).

Оценка защищенности оптико-электронного канала утечки речевой информации актуальна, поскольку существует возможность перехвата речевого сигнала дистанционно (на значительном расстоянии от объекта информатизации).

**Анализ существующих методов и способов утечки информации.** Защита информации за счет быстрого развития технологий ее перехвата усложняется.

Объектом исследования нами выбран оптико-электронный канал утечки речевой информации; предмет исследования – методика оценивания отношения сигнал/шум.

Цель работы – разработка математической модели оценки защищенности и на ее основе построение плотности распределения фазы при различных энергетических показателях.

Оптико-электронный (лазерный) канал утечки акустической речевой информации образуется при облучении лазерным лучом вибрирующих под действием акустического речевого сигнала отражающих поверхностей помещений (оконных стекол, зеркал и т.д.). Отраженное лазерное излучение модулируется по амплитуде и фазе и принимается приемником оптического (лазерного) излучения, при демодуляции которого выделяется речевая информация.

Для организации такого канала предпочтительным является использование зеркального отражения лазерного луча. При небольших расстояниях до отражающих поверхностей (порядка нескольких десятков метров) может быть использовано диффузное отражение лазерного излучения.

Сложные лазерные системы, работающие в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн, применяются для перехвата речевой информации по оптическому каналу.

Чтобы обнаружить информативный сигнал в шумах высокого уровня в канале утечки информации необходимо обеспечить:

- оценку в условиях фоновых (естественных) и искусственных шумов;
- реализацию пространственной обработки;
- оценку смеси сигнал + шум для определения уровня сигнала;
- оценку реверберационной помехи, резонансных явлений;
- учет неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ);
- оценку разборчивости речи в оптическом канале утечки информации.

Предлагается проанализировать корреляционную теорию разборчивости речи [1, с. 75]. Корреляционный метод учитывает факторы, влияющие на методическую (теоретическую) погрешность (точность) оценки разборчивости речи в канале утечки информации:

- кривые чувствительности уха;
- нормируемое значение ослабления сигнала элементами конструкции;
- спектральная плотность речи;
- неравномерность АЧХ среды передачи;
- резонансы конструкции, замкнутого пространства;
- реверберация (послезвучание);
- искусственные помехи.

**Выбор измерительного сигнала.** Гармонический сигнал принят в качестве измерительного сигнала корреляционной теорией разборчивости речи. Для обработки его используют согласованный квадратурный приемник, который чувствителен к начальной фазе измерительного сигнала. Высокая селективность согласованного квадратурного приемника решает задачу достоверного выявления измерительного сигнала во всех каналах утечки речевой информации. Гармоническому сигналу не присущи факторы, снижающие методическую погрешность измерения. В шумах высокого уровня время выделения слабого измерительного сигнала увеличивается. Происходит его накопление (увеличение отношения мощности сигнала к мощности шума) и уменьшение деформации спектральной плотности финитного гармонического сигнала.

Локальная измерительная схема для гармонического сигнала обладает преимуществом перед схемой измерения для шумового сигнала – установлены метрологические требования на величину погрешности и чувствительности. Результатом измерений методом гармонического сигнала является величина разборчивости речи, полученная на основании корреляционной теории разборчивости речи. Величина разборчивости речи представляет единый критерий оценки канала утечки речевой информации.

Сигнал линейной частотной модуляции (ЛЧМ) позволяет расширить возможность оценки защищенности речи и контролировать полосы частот, однако недостатком измерительного ЛЧМ-сигнала является наличие порогового эффекта. При снижении отношения мощности сигнала к мощности шума ниже порогового значения наблюдается резкое снижение возможности выделения сигнала из шумов [2].

Из анализа работы [3] следует, что в отраженных от стекла пучках лазерного излучения присутствует три вида модуляции оптического излучения:

- 1) частотная, вызванная эффектом Доплера вследствие колебательных движений оконного стекла под воздействием акустических сигналов;
- 2) фазовая, вызванная наличием в отраженном сигнале как зеркально отраженного излучения, так и дифракционных компонентов;
- 3) амплитудная модуляция, вызванная колебаниями подсвечивающего пучка относительно направления зеркального (максимального) отражения.

Особенность оптико-электронного канала заключается в том, что остроуправленный луч света, падающий на колеблющуюся под воздействием акустических колебаний поверхность, подвергает амплитудно-фазовой модуляции оптический отраженный или преломленный луч. Акустические колебания среды переходят в колебания твердой поверхности, что рассмотрено в виде модели колеблющейся прямоугольной мембраны.

Мембраной называется свободно изгибающаяся, натянутая на некоторый плоский контур пленка. Рассматриваются малые колебания мембраны. Считается, что площадь ее неизменна, а колебания каждой точки совершаются в направлении, перпендикулярном к плоскости  $xOy$ . Через  $u = u(x, y, t)$  обозначили величину отклонения точки  $(x, y)$  мембраны от положения покоя [5, с. 351].

Для вынужденных колебаний уравнение имеет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{F(x, y, t)}{\rho}. \quad (1)$$

Здесь  $c^2 = T/\rho$ ,  $T$  – натяжение мембраны,  $\rho$  – ее поверхностная плотность,  $F(x, y, t)$  – сила, отнесенная к единице площади.

В случае свободных колебаний мембрана представляет собой прямоугольник  $R$  ( $0 \leq x \leq a$ ,  $0 \leq y \leq b$ ).  $ka = m\pi$ ,  $lb = n\pi$ , где  $m, n$  – целые [4]. Отсюда

$$\begin{aligned} k &= \frac{m\pi}{a}, \\ l &= \frac{n\pi}{b} \\ (m &= 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots). \end{aligned} \tag{2}$$

В силу частных условий при

$$\lambda = \lambda_{mn} = \sqrt{k_m^2 + l_m^2} = \pi \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}} \tag{3}$$

функции (1) имеют вид

$$\begin{aligned} u_{mn}(x, y, t) &= (A_{mn} \cos(c\lambda_{mn}t) + B_{mn} \sin(c\lambda_{mn}t)) \sin \frac{\pi mx}{a} \cos \frac{\pi ny}{b} \\ (m &= 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots) \end{aligned} \tag{4}$$

и являются частными решениями уравнения свободных колебаний, удовлетворяющими контурному условию  $u = 0$ .

Частоты собственных колебаний имеют вид

$$\omega_{mn} = c\lambda_{mn} = \pi c \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}} \quad (m = 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots), \tag{5}$$

а соответствующие периоды

$$\tau_{mn} = \frac{2\pi}{\omega_{mn}} = \frac{2}{c \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}} \quad (m = 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots). \tag{6}$$

Окончательно формула (4) примет вид

$$u_{mn} = H_{mn} \sin(\omega_{mn}t + \alpha_{mn}) \sin(\pi mx) \cos(\pi ny), \tag{7}$$

где

$$H_{mn} = \sqrt{A_{mn}^2 + B_{mn}^2}. \tag{8}$$

Для упрощения расчетов примем, что все стороны прямоугольника равны, поэтому узловые линии на квадратной мембране с предложенными частотами могут иметь вид, представленный на рисунке 1.

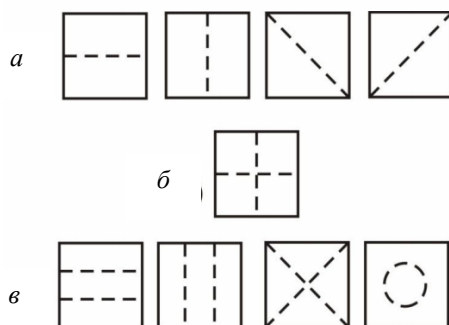


Рисунок 1 – Изображение узловых линий на квадратной мембране:  
 $a$  – с частотой  $\omega = \pi c \sqrt{5}$ ;  $b$  – с частотой  $\omega = \pi c \sqrt{7}$ ;  $c$  – с частотой  $\omega = \pi c \sqrt{10}$

Оценка степени опасности информативного вибрационного сигнала заключается в определении коэффициентов виброизоляции ограждающих конструкций, а также различных элементов инженерно-технических систем, включая их коммуникации, в измерении уровня вибрационного шума и ограждающих конструкций, в вычислении информационного показателя оценки защищенности – разборчивости речи  $W$  с последующим сопоставлением полученного значения показателя с нормативным значением  $W_n$ . При этом если нормы на защиту речевой информации ограниченного доступа не выполняются, а уровень вибрационного информативного сигнала превышает уровень вибрационного шума, то определяется дальность перехвата речевой информации лазерными средствами разведки и дальность перехвата данных, снимаемых со стетоскопов разведки и передаваемых в ИК диапазоне.

Если дальность перехвата оптико-электронными средствами разведки не превышает радиуса контролируемой зоны, то принимается решение об отсутствии утечки информации по оптико-электронному каналу [4].

**Математическая модель электронно-оптического канала.** В первую очередь следует пояснить, почему используется фазовая модуляция, а не частотная. По Гоноровскому [6, с. 145], частота есть не что иное, как скорость изменения фазы колебания. Полная фаза колебания в момент  $t$  может быть определена как

$$\varphi(t) = \int \omega(t) dt = \int_0^t \omega(t) dt + \theta_0 . \quad (9)$$

Частота может изменяться во времени, ее можно представить интегральным и дифференциальным соотношениями:

$$\varphi(t_2) - \varphi(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt , \quad (10)$$

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} . \quad (11)$$

В этих выражениях  $\omega(t) = 2\pi f(t)$  – мгновенная частота колебаний.

Из соотношений (9) и (11) следует, что изменение фазы колебаний во времени по закону  $\varphi(t)$  приводит к изменению мгновенной частоты по закону производной от  $\varphi(t)$ , а изменение мгновенной частоты по закону  $\omega(t)$  приводит к изменению фазы по закону интеграла от  $\omega(t)$ .

Представим колебание в виде гармонического квадратурного сигнала  $s(t)$ , представленного

$$s(t) = a \cdot \cos(\omega t) + b \cdot \sin(\omega t) . \quad (12)$$

По преобразованию Гильберта получаем сопряженный сигнал  $s_1(t)$

$$s_1(t) = a \cdot \sin(\omega t) - b \cdot \cos(\omega t) . \quad (13)$$

Данный вид колебаний возникает при излучении синусоидального и косинусоидального сигналов, представленных векторной диаграммой на рисунке 2.

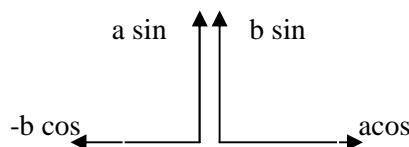


Рисунок 2 – Векторная диаграмма

Вибрации или колебания создают амплитудно-фазовую модуляцию. Отличительной особенностью проведенной работы от работы [3] является получение отдельных значений амплитудной и фазовой составляющих.

$$A(t) = \sqrt{(a \cdot \cos \theta(t) + b \cdot \sin \theta(t))^2 + (a \cdot \sin \theta(t) - b \cdot \cos \theta(t))^2} = \sqrt{a^2 + b^2} = a\sqrt{1+k} , \quad (14)$$

где  $k = \frac{b}{a}$ ,

$$\psi(t) = \operatorname{arctg} \frac{\cos \theta(t) + k \cdot \sin \theta(t)}{\sin \theta(t) - k \cdot \cos \theta(t)}. \quad (15)$$

Таким образом, применение гармонического квадратурного сигнала позволяет находить амплитудно-фазовую модуляцию как суммарный эффект воздействующий на измерительный сигнал.

В работе [7, с. 166] предположено, что кроме флуктуационного шума на систему воздействует немодулированное колебание с амплитудой  $U_0$ , частота которого равна резонансной частоте системы. Задача об огибающей является нелинейной, поэтому немодулированное колебание (сигнал) и флуктуационное напряжение должны рассматриваться совместно.

Конечная формула для плотности вероятности фазы отражает энергетический критерий (отношение мощности сигнала к мощности шума).

Случайная фаза шумового напряжения, под которой подразумевается угол, образованный изображающим случайный процесс вектором  $U$  с осью абсцисс:

$$\begin{aligned} u &= U \sin \theta, \\ v &= U \cos \theta. \end{aligned} \quad (16)$$

Следовательно, подлежащее изучению нелинейное преобразование имеет вид

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{u}{v}, \quad (17)$$

тогда  $U = \sqrt{u^2 + v^2}$ , а плотность вероятностей амплитуды принимает вид закона распределения Рэлея, что говорит об отсутствии сигнала ( $U_0 = 0$ ) [7, с.147]

$$\omega(U) = \frac{U}{\sigma^2} e^{-\frac{U^2}{2\sigma^2}}. \quad (18)$$

Если все фазы вектора шумового напряжения равновероятны, то на плоскости проекций  $uv$  имеет место полная круговая симметрия. Это позволяет произвольным образом повернуть оси  $u$  и  $v$ , сохраняя их взаимную перпендикулярность. Для поставленной задачи удобно направить ось  $u$  вдоль вектора  $U_0$  сигнала, а ось  $v$  – перпендикулярно к нему. Тогда длину вектора результирующего напряжения можно записать так

$$U = \sqrt{(U_0 + u)^2 + v^2}. \quad (19)$$

Используя двумерную плотность вероятностей [7, с. 147] для данных проекций, имеем:

$$\omega(u, v) = \omega(u)\omega(v) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}}. \quad (20)$$

Характеристическая функция примет вид

$$A(z) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} e^{iz\sqrt{(U_0+u)^2+v^2}} \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}} dudv. \quad (21)$$

Введем новые переменные интегрирования  $U$  и  $\theta$ , связанные с  $u$  и  $v$  соотношениями

$$\begin{aligned} U_0 + u &= U \cos \theta, \\ v &= U \sin \theta. \end{aligned} \quad (22)$$

Случайная фаза  $\theta$ , представляющая собой угол, образованный результирующим вектором  $U$  и вектором сигнала  $U_0$ , принимает следующий вид:

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{v}{U_0 + u}. \quad (23)$$

Плотность вероятностей амплитуды принимает вид закона распределения Райса, что говорит о наличие сигнала ( $U_0 \neq 0$ ) [7, с. 147]:

$$\omega(U) = \frac{U}{\sigma^2} I_0\left(\frac{UU_0}{\sigma^2}\right) e^{-\frac{U^2+U_0^2}{2\sigma^2}}, \quad (24)$$

где  $I_0$  – функция Бесселя

$$I_0 \approx \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}}. \quad (25)$$

При замене переменных характеристическая функция примет вид

$$A(z) = \int_{-\pi}^{+\pi} e^{iz\theta} d\theta \frac{e^{-\frac{U_0^2}{2\sigma^2}}}{2\pi\sigma^2} \int_0^{\infty} U e^{-\frac{U^2-2UU_0 \cos \theta}{2\sigma^2}} dU. \quad (26)$$

Вычисление внутреннего интеграла последнего выражения выполним, пользуясь формулой

$$\int_0^{\infty} x e^{-p^2 x^2 + qx} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2p^2} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} + \frac{q}{2p} e^{\frac{q^2}{4p^2}} \left[ 1 + \Phi\left(\frac{q}{2p}\right) \right] \right\}, \quad (27)$$

где  $\Phi(z)$  – интеграл вероятности ошибок

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (28)$$

Формула (27) может быть получена из табличной

$$\int_0^{\infty} x e^{-p^2 x^2 + qx} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2p} e^{\frac{q^2}{4p^2}} \left[ 1 + \Phi\left(\frac{q}{2p}\right) \right] \quad (29)$$

дифференцированием обеих ее частей по параметру  $q$ .

В данном случае

$$p = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma}, \quad q = \frac{U_0}{\sigma^2} \cos \theta. \quad (30)$$

Применение формулы (27) дает для плотности вероятности фазы  $\omega(\theta)$  следующее выражение:

$$\omega(\theta) = \frac{e^{-\eta^2}}{2\sqrt{\pi}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} + \eta \cos \theta e^{\eta^2 \cos^2 \theta} \left[ 1 + \Phi(\eta \cos \theta) \right] \right\}. \quad (31)$$

Здесь  $\eta = \frac{U_0}{\sqrt{2}\sigma}$  – отношение эффективных напряжений сигнала и шума на выходе системы.

При отсутствии сигнала ( $\eta = 0$ ) выражение (31) превращается в  $\omega(0) = \frac{1}{2\pi}$ .

Увеличение амплитуды сигнала приводит к концентрации наиболее вероятных значений фазы около  $\theta = 0$ . Это означает, что фаза результирующего колебания все в большей степени определяется фазой сигнала (рис. 3).

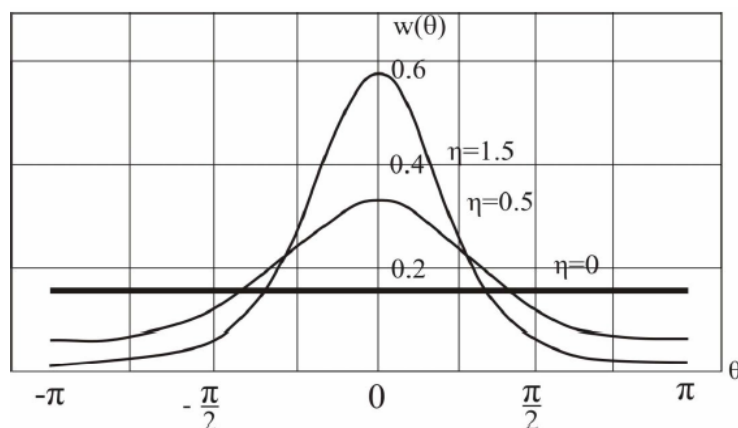


Рисунок 3 – График плотности вероятности фазы при различных отношениях сигнал/шум

**Заключение.** Используя квадратурный гармонический измерительный сигнал, была решена задача выделения амплитудной и фазовой модуляции измерительных сигналов в канале утечки речевой информации по оптико-электронному каналу.

Обосновано применение корреляционного метода для определения нормируемой величины разборчивости речи в канале утечки информации. Энергетический показатель, определенный как отношение сигнал/шум, зависит от фазы результирующего колебания.

С помощью полученной математической модели обработки сигнала, модулированного по амплитуде, фазе и частоте, проанализирован оптико-электронный канал на наличие утечки информации по суммарному эффекту амплитудно-фазовой модуляции, воздействующей на направленный луч.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Железняк, В.К. Защита информации от утечки по техническим каналам : учеб. пособие/ В.К. Железняк ; ГУАП. – СПб., 2006. – 188 с.
2. Дидковский, В.С. Акустическая экспертиза каналов речевой коммуникации : моногр. / В.С. Дидковский, М.В. Дидковская, А.Н. Продеус. – Киев, 2008. – 420 с.
3. Глущенко, А.В. Математическая модель получения информации об акустическом речевом сигнале по отраженному лазерному излучению : А.В. Глущенко, Л.А. Глущенко, В.И. Тупота // Лазеры. Измерения. Информация-2010 : сб. докл. 20-й междунар. конф. ; Санкт-Петербург, 1-3 июня 2010 г. / С.-Петерб. политехн. ун-т. – СПб., 2010. – Т. 1. – С. 209–220.
4. Заказнов, Н.П. Теория оптических систем : учебник для студентов приборостроительных специальностей вызов / Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.Н. Кузичев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1992. – 448 с. : ил.
5. Толстов, Г.П. Ряды Фурье / Г.П. Толстов. – изд. 2, испр. – М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1960. – 390 с.
6. Топорец, А.С. Оптика шероховатой поверхности / А.С. Топорец. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 191 с. : ил.
7. Лебедев, В.Л. Случайные процессы в электрических и механических системах / В.Л. Лебедев. – М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1958. – 390 с.

Поступила 15.09.2015

## MODEL EVALUATION OPTOELECTRONIC CHANNEL LEAKED SPEECH

V. ZHELEZNYAK, I. CHERNOVA

*Analyzed opto-electronic channel leakage of voice information. The choice of the measurement signal on the basis of the considered advantages quadrature harmonic signal. A method for measuring signal, including an assessment of the cumulative effect of amplitude and phase modulation. Different types of signal processing techniques, the method chosen, the factors affecting the methodological (theoretical) uncertainty (accuracy) evaluating intelligibility. Acoustic vibrations of the solid medium, subject to amplitude and phase modulation, presents a model of a rectangular vibrating membrane. The method of estimating the signal / noise ratio by using the mathematical model developed security assessment. Built density distribution phase at various energy indicators showing the degree of dependence of the phase fluctuations resulting from the phase of the signal.*