



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКУСТООПТИЧЕСКОГО КАНАЛА УТЕЧКИ РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ

В статье представлена математическая модель акустооптического канала утечки акустической речевой информации. В качестве показателя оценки возможностей лазерной системы акустической речевой разведки (ЛСААР) используется словесная разборчивость речи W_c , рассчитываемая на линейном выходе ЛСААР с учетом вероятности обнаружения отраженного от зондируемой поверхности лазерного излучения приемником оптического излучения ЛСААР. Получены аналитические соотношения для расчета вероятности обнаружения отраженного сигнала для трех видов отражения: а) диффузное; б) зеркальное; в) смешанное. Для расчета словесной разборчивости используется вероятностная методика оценки разборчивости речи.

Ключевые слова: выделенное помещение, акустооптический канал утечки акустической речевой информации, лазерная система акустической речевой разведки, математическая модель, словесная разборчивость речи.

Horev A.A.

MATHEMATICAL MODEL OF THE ACOUSTO-OPTIC CHANNEL OF SPEECH INFORMATION LEAKAGE

The article presents a mathematical model of the acousto-optic channel of acoustic speech information leakage. As an indicator of the evaluation of the capabilities of the laser acoustic speech intelligence system (LSARR), the verbal intelligibility of W_c speech is used, calculated at the linear output of the LSARR, taking into account the probability of detection of laser radiation reflected from the probed surface by an optical radiation receiver. Analytical relations are obtained for calculating the probability of detecting a reflected signal for three types of reflection: a) diffuse; b) specular; c) mixed. To calculate the verbal intelligibility of speech, a probabilistic method of assessing speech intelligibility is used.

Keywords: dedicated room, acousto-optic channel of acoustic speech information leakage, laser system of acoustic speech intelligence, mathematical model, verbal intelligibility of speech.

Одним из наиболее опасных технических каналов утечки акустической речевой информации из выделенных помещений (ВП), позволяющим перехватывать речевую информацию из-за пределов контролируемой зоны объекта, является акустооптический технический канал утечки информации [1].

Перехват акустической речевой информации по акустооптическому каналу осуществляется с использованием лазерных систем акустической речевой разведки (ЛСАРР), часто называемых «лазерными микрофонами», путем лазерного «зондирования» отражающих поверхностей, например, оконных стекол, оконных штор, жалюзи или различных предметов, установленных в ВП [1, 2].

С целью оценки возможности перехвата акустической речевой информации из выделенных помещений по техническим каналам и выбора наиболее рациональных способов и средств защиты информации используются методики, в основу которых положены математические модели технических каналов утечки информации.

Под математической моделью будем понимать совокупность уравнений и других математических соотношений, отражающих процесс перехвата речевой информации из ВП лазерными системами акустической речевой разведки.

Учитывая, что целью перехвата речевой информации из ВП, является определение смыслового содержания перехваченного разговора, в качестве показателя оценки возможностей лазерной системой акустической речевой разведки (ЛСАРР) используется словесная разборчивость речи W_c , под которой понимается отношение правильно распознанных слов к общему количеству слов в перехваченном разговоре [1].

Вопросам, связанным с математическим моделированием акустооптического канала утечки речевой информации, посвящены работы [2, 3 – 6].

В работе [3] представлена модель акустооптического канала утечки речевой информации, учитывающая преобразования исходного информативного акустического сигнала и шумовых составляющих в точках «съема» информации ЛСАРР. Однако данная модель не учитывает характеристик ЛСАРР, отражаю-

щей поверхности, условий ведения разведки, а также особенностей восприятия зашумленных речевых сигналов оператором.

В статье [4] также предложена математическая модель акустооптического канала утечки речевой информации, в которой в качестве показателя эффективности перехвата речевой информации ЛСАРР используется словесная разборчивость речи, для расчета которой используется формантный метод оценки разборчивости речи. В качестве исходных данных для расчета словесной разборчивости речи используются отношения сигнал/шум на выходе звуковоспроизводящего устройства приемника ЛСАРР в 7-ми октавных полосах речевого диапазона частот, которые определяются отношением вибрационный сигнал/шум на отражающей поверхности. Однако предложенный подход не в полной мере учитывает особенности обнаружения приемником оптического излучения ЛСАРР отраженного от вибрирующей поверхности лазерного сигнала.

В статье [5] была решена задача выделения амплитудной и фазовой модуляции информативных сигналов в акустооптическом канале утечки речевой информации. Однако, учитывая, что в работе отсутствуют методические подходы и аналитические соотношения, позволяющие рассчитать разборчивость речи при перехвате информации по акустооптическому каналу, полученные результаты носят чисто научный характер.

В статье [6] показана возможность использования корреляционного подхода к определению разборчивости речи при перехвате информации по акустооптическому каналу. Однако в работе отсутствуют математические соотношения, позволяющие рассчитать разборчивость речи в зависимости характеристик речевого сигнала, характеристик ЛСАРР, отражающей поверхности и условий ведения разведки, что не позволяет использовать предложенный подход в практической деятельности.

Наиболее подробно вопросы, связанные с моделированием акустооптического канала утечки речевой информации, рассмотрены в монографии [2]. В этой работе приведена описательная модель акустооптического канала утечки речевой информации, рассмо-

трены принципы и особенности построения ЛСАРР, особенности отражения лазерного излучения от различных поверхностей, включая оптические призмы, влияние атмосферы на распространение лазерного излучения. В качестве показателя оценки возможности ЛСАРР использована разборчивость речи и предложены методические подходы ее расчета. В работе предпринята попытка разработки математической модели акустооптического канала утечки речевой информации. Однако в данной модели отсутствуют математические зависимости разборчивости речи от характеристик речевого сигнала, характеристик ЛСАРР, характеристик отражающей поверхности, и помех, воздействующих на отражающую поверхность, а также условий ведения разведки.

Целью данной работы является разработ-

ка математической модели акустооптического технического канала утечки речевой информации из выделенного помещения, учитывающей как характеристики речевого сигнала, так и характеристики ЛСАРР, характеристики отражающей поверхности, характеристики помех, воздействующих на отражающую поверхность, а также условий ведения разведки.

Анализ ЛСАРР показал, что наиболее вероятно они строятся на базе лазерных доплеровских виброметров (ЛДВ) [7], поэтому в основу математической модели акустооптического канала утечки речевой информации положим принципы построения и функционирования ЛДВ.

Упрощённая структурная схема ЛДВ, построенного по схеме интерферометра, приведена на рис. 1 [8, 9].

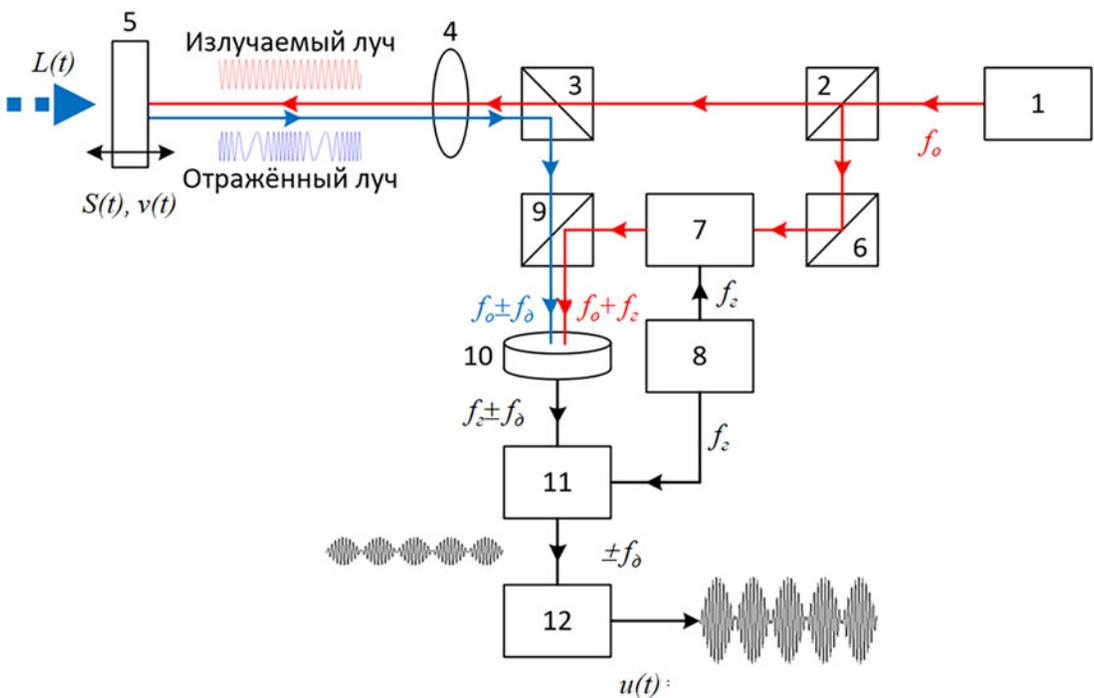


Рис. 1. Упрощённая структурная схема ЛДВ, построенного по схеме интерферометра

Принцип работы ЛДВ заключается в следующем.

Луч от источника лазерного излучения (1) с помощью призмы (2) разделяется на два луча с одинаковыми амплитудами – измерительный и опорный. Первый из них фокусируется с помощью линзы (4) на зондируемой отражающей поверхности (5).

Второй (опорный) луч через призму (6) подается на устройство сдвига частоты (7), которое применяется в схеме с целью форми-

рования несущей частоты колебания выходного сигнала фотоприёмника. В качестве такого устройства наиболее часто используется ячейка Брэгга или электрооптический преобразователь. Частота сдвига опорного луча будет определяться частотой генератора (8).

Вследствие вибрации отражающей поверхности под воздействием акустического сигнала $L(t)$ происходит доплеровский сдвиг частоты отраженного лазерного излучения f_d , который рассчитывается по формуле [8, 9]

$$f_o(t) = \frac{2v(t) \cos \alpha}{\lambda}, \quad (1)$$

где $v(t)$ – мгновенная скорость колебаний отражающей поверхности, мкм/с;

α – угол между линией визирования ЛСАРР и нормалью к отражающей поверхности (угол зондирования отражающей поверхности), град;

λ – длина волны излучения лазера, мкм.

С помощью призмы (9) опорный луч с частотой $f_o + f_z$ также направляется на приемник оптического излучения (10), в котором происходит формирование интерференционной картины, которое заключается в одновременном воздействии двух сигналов на нелинейный элемент электрической цепи (фотодетектор).

Результирующий сигнал на выходе приемника оптического излучения является типичным частотно-модулированным сигналом будет определяться уравнением [8,9]:

$$u_{nu}(t) = k_{nu} \cdot \left\{ \cos \left[2\pi \cdot (f_z + f_o)t + \Delta\varphi \right] \right\} = k_{nu} \cdot \left\{ \cos \left[2\pi \cdot \left(f_z + \frac{2v}{\lambda} \right) t + \Delta\varphi \right] \right\}, \quad (2)$$

где k_{nu} – коэффициент, зависящий от чувствительности приемника излучения и мощности сигналов лазерного излучения;

$\Delta\varphi$ – разность фаз измерительного и опорного лучей.

На частотный дискриминатор (11) подается сигнал с выхода приемника оптического излучения (10) с частотой $f_z + f_o$ и с выхода генератора (8) с частотой f_z . Методом частотной демодуляции частот f_z вычитается цепью фазовой автоподстройки, а выходной сигнал выражается как [8,9]:

$$u(t) = k_{\omega} \cdot \frac{2v(t) \cos \alpha}{\lambda}, \quad (3)$$

где k_{ω} – коэффициент, зависящий от характеристик частотного дискриминатора.

Электрический сигнал с выхода частотного дискриминатора (11) усиливается по мощности с помощью усилителя (12).

Перехваченный разговор прослушивается оператором через динамики или головные наушники, сигнал на которые подается с линейного выхода приемника ЛСАРР.

Следовательно, разборчивость перехваченного разговора зависит от отношения сигнал/шум на линейном выходе приемника ЛСАРР.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что ЛДВ нормально функционируют, если сигнал на входе приемника

оптического излучения (ПОИ) превышает пороговое значение, при котором обеспечивается требуемая точность измерения виброскорости (виброускорения или виброперемещения).

Минимальное отношение сигнал/шум, при котором обеспечивается нормальное функционирование ЛДВ, часто называют пороговым отношением сигнал/шум, которое обычно составляет более 6 дБ [10].

Вероятность превышения сигнала на входе приемника оптического излучения порогового значения называют вероятностью обнаружения сигнала.

Учитывая вышесказанное, словесную разборчивость речи при перехвате ЛСАРР (W_c) можно рассчитать по формуле:

$$W_c = p \cdot W_{com'} \quad (4)$$

где p – вероятность обнаружения отраженного от зондируемой поверхности сигнала приемником оптического излучения ЛСАРР (вероятность превышения отраженного от зондируемой поверхности и падающего на приемник оптического излучения лазерного сигнала установленного порогового значения);

W_{com} – словесная разборчивость речи на линейном выходе ЛСАРР, при условии обнаружения отраженного от зондируемой поверхности сигнала приемником оптического излучения ЛСАРР.

Предположим, что сигнал, поступающий на вход приемника оптического излучения, детерминированный с математическим ожиданием P_c , а шумы приемника имеют нормальную плотность распределения вероятности с математическим ожиданием, равным нулю, и дисперсией – $\sigma_{ш}^2$.

Используя критерий Неймана – Пирсона рассчитаем вероятность обнаружения сигнала приемником оптического излучения ЛСАРР [1]:

$$p = \Phi \left[q_{nu} - \Phi^{-1}(1 - p_{\text{лт}}) \right], \quad (5)$$

где q_{nu} – отношение сигнал/шум (по мощности) на входе приемника оптического излучения ЛСАРР;

$p_{\text{лт}}$ – вероятность ложной тревоги;

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad \text{– интеграл вероятности;}$$

$\Phi^{-1}(x)$ – функция, обратная $\Phi(x)$.

Значение вероятности ложной тревоги может составлять от 10^{-3} до 10^{-6} . Например, $p_{\text{лт}} = 10^{-3}$ уравнение (5) примет вид

$$p \approx \Phi \left[q_{nu} - 3,2 \right] \quad (6)$$

Следовательно, для расчета вероятности

обнаружения отраженного от зондируемой поверхности сигнала приемником оптического излучения ЛСАРР, необходимо рассчитать отношение сигнал/шум (q_{nu}) на входе приемника оптического излучения ЛСАРР.

При расчете отношения сигнал/шум на

входе приемника оптического излучения ЛСАРР необходимо учитывать, что в качестве отражающей поверхности в ВП могут использоваться как оконные стекла, так и шторы и жалюзи (рис.1).

Отношение сигнал/шум на входе прием-

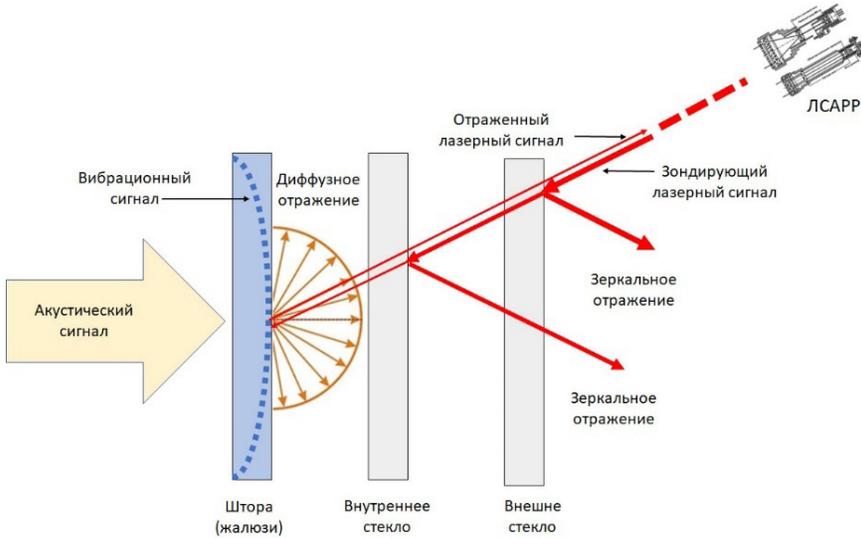


Рис. 1. Схема перехвата речевой информации из выделенного помещения лазерной системой акустической речевой разведки

ника оптического излучения ЛСАРР рассчитывается по формуле:

$$q_{nu} = \frac{P_c}{P_w}, \quad (7)$$

где P_c – мощность сигнала, отраженного от зондируемой поверхности и попавшая на приемник оптического излучения ЛСАРР, Вт;

P_w – мощность шумов на входе приемника оптического излучения ЛСАРР, Вт.

Расчет мощности сигнала, отраженного от зондируемой поверхности, на входе приемника оптического излучения проведем для трех видов отражения (рис. 2):

- а) диффузное отражение лазерного излучения от зондируемой поверхности;
- б) зеркальное отражение лазерного излучения от зондируемой поверхности;
- в) смешенное отражение лазерного излучения от зондируемой поверхности.

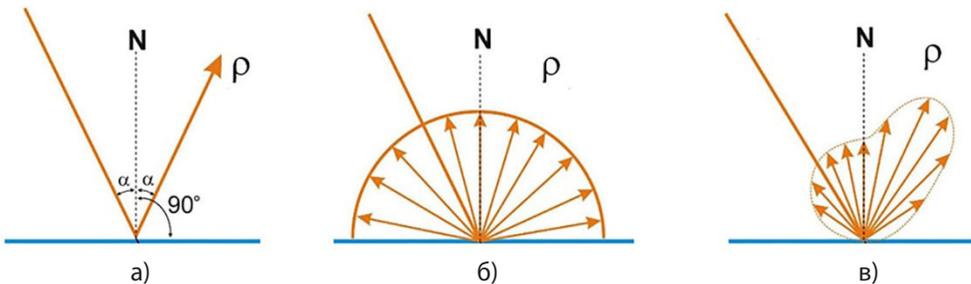


Рис. 2. Виды отражения лазерного излучения от зондируемой поверхности: а) диффузное отражение с равномерным отражением в верхнюю полусферу; б) зеркальное отражение; в) смешенное отражение

а) Диффузное отражение лазерного излучения от зондируемой поверхности

Рассмотрим случай диффузного отражения с равномерным отражением в верхнюю полусферу.

Плотность потока мощности лазерного излучения на зондируемой поверхности Π_{omp} , Вт/м², рассчитаем по формуле [11]:

$$\Pi_{omp} = \frac{P_{из} \cdot \tau_l \cdot \tau_{cp} \cdot \cos \alpha}{(\pi d_a^2 / 4)} = \frac{4 \cdot P_{из} \cdot \tau_l \cdot \tau_{cp} \cdot \cos \alpha}{\pi (D_n \cdot \theta)^2}, \quad (8)$$

где $P_{из}$ – мощность непрерывного лазерного излучения, Вт;

α – угол между линией визирования ЛСАРР и нормалью к отражающей поверхности (угол зондирования отражающей поверхности);

d_l – диаметр пятна лазерного луча на отражающей поверхности, м;

D_n – дальность от отражающей поверхности до аппаратуры разведки, м;

τ_l – коэффициент пропускания передающей оптической системы ЛСАРР;

τ_{cp} – коэффициент пропускания среды на пути распространения лазерного луча (коэффициент пропускания оконных стекол, пленок, установленных на оконных стеклах, атмосферы и т.д.);

θ – расходимость лазерного луча, рад.

Мощность, отраженная от зондируемой поверхности в направлении на приемник излучения $P_{отпр}$ Вт, рассчитывается по формуле:

$$P_{отпр} = P_{отпр} \cdot S_{отпр.о} \cdot \rho_o = \frac{4 \cdot P_{из} \cdot \tau_l \cdot \tau_{cp} \cdot \cos \alpha \cdot S_{отпр.о} \cdot \rho_o}{\pi (D_n \cdot \theta)^2}, (9)$$

где $S_{отпр.о}$ – площадь поверхности диффузного отражения лазерного излучения, м²;

ρ_o – коэффициент диффузного отражения поверхности на длине волны λ .

Площадь поверхности диффузного отражения лазерного излучения $S_{отпр.о}$ м², рассчитаем по формуле:

$$S_{отпр.о} = S_{отпр} = (\pi d_l^2 / 4) / \cos \alpha = \pi (D_n \cdot \theta)^2 / (4 \cdot \cos \alpha), (10)$$

где $S_{отпр}$ – общая площадь поверхности отражения лазерного излучения, м².

Подставляя формулу (8) в формулу (7) получим

$$P_{отпр} = \frac{4 \cdot P_{из} \cdot \tau_l \cdot \tau_{cp} \cdot \cos \alpha \cdot \rho_o}{\pi (D_n \cdot \theta)^2} \cdot \pi (D_n \cdot \theta)^2 / (4 \cdot \cos \alpha) = P_{из} \cdot \tau_l \cdot \tau_{cp} \cdot \rho_o. (11)$$

Плотность потока мощности сигнала, отраженного от зондируемой поверхности в верхнюю полусферу, на объективе приемника оптического излучения Π_{np} Вт/м², рассчитаем по формуле:

$$\Pi_{np} = \frac{P_{отпр} \cdot \tau_{cp}}{\pi D_n^2 / (4 \cdot 2)} = \frac{8 \cdot P_{из} \cdot \tau_l \cdot \tau_{cp}^2 \cdot \rho_o}{\pi D_n^2}. (12)$$

При этом, мощность лазерного излучения, попавшая на объектив приемника $P_{np.о}$ Вт, будет равна:

$$P_{np.о} = \Pi_{np} \cdot \frac{\pi d_o^2}{4} = \frac{4 \cdot P_{из} \cdot \tau_l \cdot \tau_{cp}^2 \cdot d_o^2 \cdot \rho_o}{D_n^2}, (13)$$

где d_o – диаметр входного зрачка объектива приемного устройства ЛСАРР, м.

Оптическая система фокусирует принимаемое лазерное излучение на приемнике оптического излучения. Полагая, что площадь приемника оптического излучения не менее, чем площадь проекции пятна лазерного излучения, мощность излучения, попавшего на приемник излучения P_c Вт, рассчитаем по формуле:

$$P_c = P_{np.о} \cdot \tau_{np} = \frac{4 \cdot P_{из} \cdot \tau_l \cdot \tau_{np} \cdot \tau_{cp}^2 \cdot d_o^2 \cdot \rho_o}{D_n^2}, (14)$$

где τ_{np} – коэффициент пропускания объектива приемного устройства ЛСАРР.

Коэффициенты отражения некоторых поверхностей приведены в табл. 1 – 2, а зависимость коэффициента отражения оконного стекла от длины волны – в табл. 3 [2].

Таблица 1

Коэффициенты отражения в видимом диапазоне длин волн некоторых поверхностей

Тип поверхности	Значение коэффициента ρ_o
Автомобильное стекло	0,11
Оконное стекло	0,13
Армированное стекло	0,4
Витринное стекло	0,25
Узорчатое стекло	0,3

Таблица 2

Отражательная способность различных поверхностей

Поверхность	Вид отражения	Коэффициент отражения
Алебастр	Диффузное	0,92
Серебро полированное	Направленное	0,88 – 0,93
Матовое серебрение	Направленно – рассеянное	0,7
Стеклозеркало	Направленное	0,72 – 0,85

Поверхность	Вид отражения	Коэффициент отражения
Хромированная полированная поверхность	Направленное	0,60 – 0,70
Матовое хромирование	Направленно – рассеянное	0,50
Алюминий полированный	Направленное	0,65 – 0,75
Алюминий матированный	Направленно – рассеянное	0,55-0,60
Бумага белая матовая	Направленно – рассеянное	0,6 – 0,7
Белая гипсовая поверхность	Диффузное	0,85
Белая клеевая покраска по оштукатуренной поверхности	Приближается к диффузному	до 0,8
Оштукатуренная поверхность	Диффузное	0,4 – 0,45
Шелк белый	Смешанное	0,35 – 0,55
Черное сукно	Направленно – рассеянное	0,1 – 0,12
Черный бархат	Диффузное	0,01 – 0,03

Таблица 3

Зависимость коэффициента отражения оконного стекла от длины волны

Длина волны λ , мкм	Значение коэффициента ρ	Длина волны λ , мкм	Значение коэффициента ρ
0,2	$9,9 \cdot 10^{-1}$	1,06	$3,37 \cdot 10^{-2}$
0,3	$9,5 \cdot 10^{-1}$	1,153	$3,36 \cdot 10^{-2}$
0,4	$3,7 \cdot 10^{-2}$	3,39	$2,89 \cdot 10^{-2}$
0,91	$3,4 \cdot 10^{-2}$	5,1	$2,78 \cdot 10^{-2}$

б) Зеркальное отражение лазерного излучения от зондируемой поверхности

Плотность потока мощности лазерного излучения на зондируемой поверхности $\Pi_{\text{опр}'}$ Вт/м², рассчитывается по формуле (8).

Мощность, отраженная от зондируемой поверхности в направлении на приемник излучения $P_{\text{опр}'}$ Вт, рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{опр}} = \Pi_{\text{опр}} \cdot S_{\text{опр},3} \cdot \rho_3 = \frac{4 \cdot P_{\text{из}} \cdot \tau_{\lambda} \cdot \tau_{\text{сп}} \cdot \cos \alpha \cdot S_{\text{опр},3} \cdot \rho_3}{\pi (D_n \cdot \theta)^2}, \quad (15)$$

где $S_{\text{опр},3}$ – площадь поверхности зеркального отражения лазерного излучения площадь отражающей поверхности лазерного излучения, м²;

ρ_3 – коэффициент зеркального отражения поверхности на длине волны λ .

Площадь отражающей поверхности лазерного излучения $S_{\text{опр},3}$, м², рассчитаем по формуле:

$$S_{\text{опр},3} = S_{\text{опр}} = (\pi d_{\lambda}^2 / 4) / \cos \alpha = \pi (D_n \cdot \theta)^2 / (4 \cdot \cos \alpha), \quad (16)$$

Подставляя формулу (14) в формулу (13) получим:

$$P_{\text{опр}} = \frac{4 \cdot P_{\text{из}} \cdot \tau_{\lambda} \cdot \tau_{\text{сп}} \cdot \cos \alpha \cdot \rho_3}{\pi (D_n \cdot \theta)^2} \cdot \pi (D_n \cdot \theta)^2 / (4 \cdot \cos \alpha) =$$

$$= P_{\text{из}} \cdot \tau_{\lambda} \cdot \tau_{\text{сп}} \cdot \rho_3, \quad (17)$$

Полагая, что зеркально отраженное излучение полностью попадает в объектив при-

емного устройства ЛСАРР и площадь приемника оптического излучения не менее площади проекции пятна принимаемого лазерного излучения, мощность излучения, попавшего на приемник излучения, Вт, рассчитаем по формуле:

$$P_c = P_{\text{опр}} \cdot \tau_{\text{пр}} \cdot \tau_{\text{сп}} \cdot \rho_3 = P_{\text{из}} \cdot \tau_{\lambda} \cdot \tau_{\text{пр}} \cdot \tau_{\text{сп}}^2 \cdot \rho_3. \quad (18)$$

Для увеличения мощности отраженного сигнала в направлении на источник лазерного излучения, независимо от взаимного расположения ЛСАРР и обучающей поверхности, на последней могут устанавливаться трипель-призмы или пленочные отражатели.

Трипель–призма представляет собой отражающий элемент, который обеспечивает возврат излучения в исходном направлении вне зависимости угла падения на входе.

Фактически трипель–призма представляет собой угловой отражатель, выполненный в виде четырехгранной стеклянной пирамиды, на три грани которой, составляющие друг с другом прямые углы, нанесены зеркальные отражательные покрытия (рис. 3) [12, 13].

Размеры трипель–призм могут составлять от нескольких миллиметров до нескольких десятков миллиметров (табл. 4). Однако могут использоваться трипель–призмы, размеры которых менее 1 мм (рис. 4) [1, 2, 12, 13].

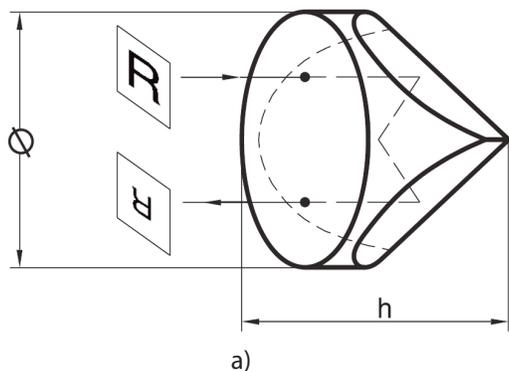


Рис. 3. Трипель – призма: схема (а), внешний вид (б)

Таблица 4

Размеры некоторых трипель-призм

Модель трипель-призмы	Размеры		Отклонение светового пучка
	Ø, мм	h, мм	
CCR0080	8.0	6.5	180°
CCR0150	15	11.3	180°
CCR0250	25 (25,4)	19	180°
CCR0380	38	28.5	180°
CCR0500	50 (50,8)	37.5	180°
GCL-030502	12,7	9,5	180°±5"
GCL-030503	25,4	19,1	180°±5"
GCL-030503	15,0	11,7	180°±5"

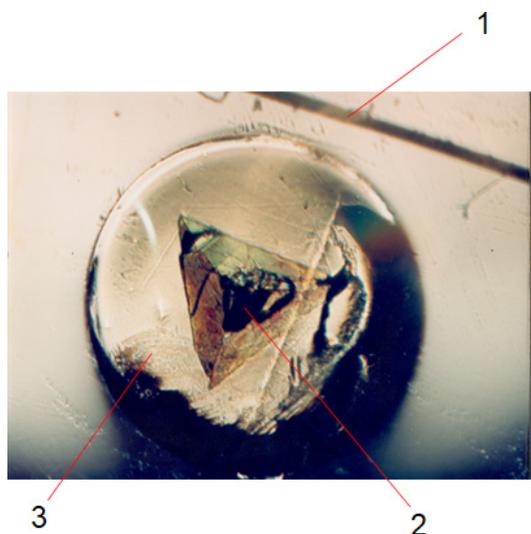


Рис. 4. Трипель-призма, установленная в оконном стекле: 1 – человеческий волос (0,05 – 0,07 мм); 2 – трипель-призма, установленная в углублении стекла; 3 – эпоксидная смола

Световозвращающая (светоотражающая) пленка представляет собой специальную самоклеящуюся наклейку, изготавливаемую из высококачественного материала, который содержит в своем внутреннем слое оптическую систему из сферических линз (микростеклошариков) либо микропризм (рис. 5) [14].

При попадании света на грани микропризм или микросфер, световой поток возвращается обратно по направлению к источнику света. Чтобы избежать нежелательной светопрозрачности и усилить интенсивность отражения света, под слой микросфер добавляется «серебряный» светоотражающий слой.

Микросферы могут иметь очень маленькие размеры 20 – 100 мкм, при этом толщина стенки может составлять 1 – 2 мкм. Например, в светоотражающих пленках «Orafol», размеры отражающих микросфер составляют от 80 – 260 мкм [15].

Световозвращающие пленки состоят из элементов (марок) с размерами от 20х20 мм до 90х90 мм и более (рис. 6) [15, 16].

При использовании световозвращающих пленок и трипель-призм, площадь которых превышает площадь пятна лазера на отражающей поверхности, и полагая, что $\rho \approx 1$ для них, формулу (18) запишем в виде:

$$P_c \approx P_{из} \cdot \tau_{л} \cdot \tau_{пр} \cdot \tau_{сп}^2. \quad (19)$$

в) смешенное отражение лазерного излучения от зондируемой поверхности:

Режим смешенного отражения наблюдается, как правило в том случае, если на отражающей поверхности устанавливаются отра-

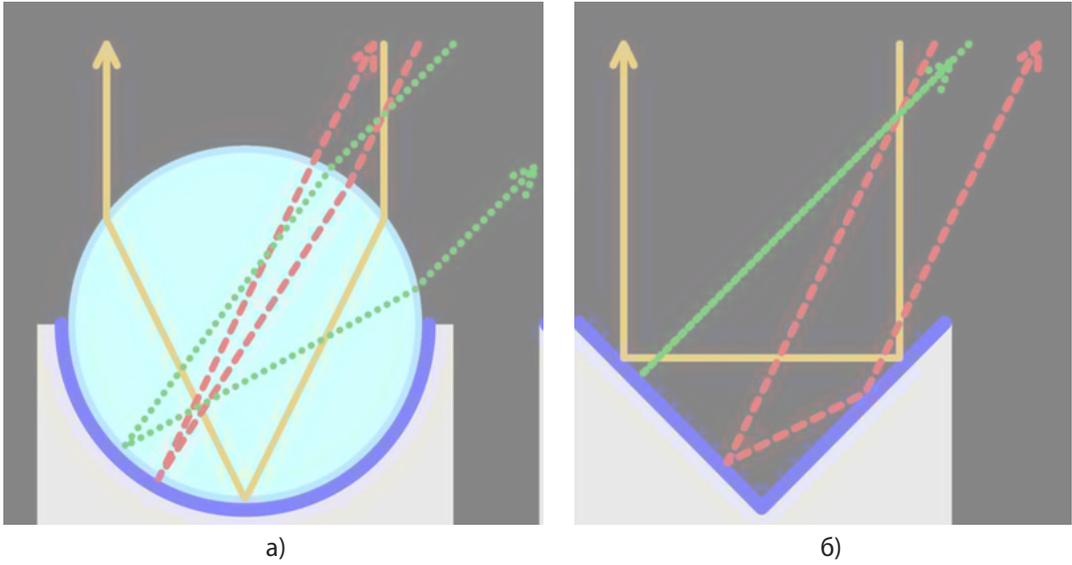


Рис. 5. Схемы отражения света от сферических линз (а) и микропризм (б)

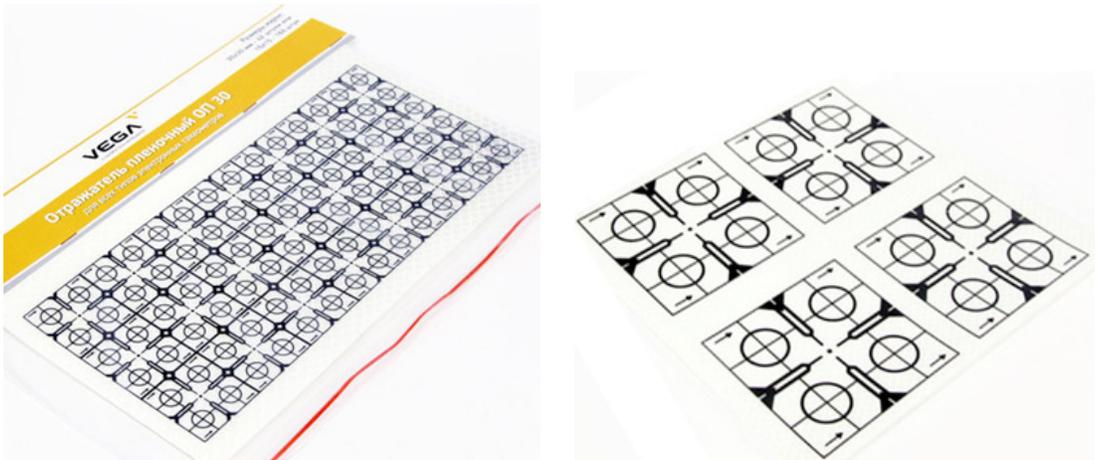


Рис. 6. Внешний вид световозвращающих пленок

жатели, которые по площади менее площади пятна лазера на отражающей поверхности.

Плотность потока мощности лазерного излучения на зондируемой поверхности $\Pi_{отпр'}$ Вт/м², рассчитывается по формуле (8).

Мощность, отраженная от зондируемой поверхности в направлении на приемник излучения $P_{отпр}$ Вт, рассчитывается по формуле:

$$P_{отпр} = \Pi_{отпр} \cdot (S_{отпр.з}^* \cdot \rho_z + S_{отпр.д}^* \cdot \rho_d) = \frac{4 \cdot P_{из} \cdot \tau_l \cdot \tau_{cp} \cdot \cos \alpha \cdot (S_{отпр.з}^* \cdot \rho_z + S_{отпр.д}^* \cdot \rho_d)}{\pi (D_n \cdot \theta)^2}, \quad (20)$$

где $S_{отпр.з}^*$ – площадь поверхности зеркально-го отражения лазерного излучения, м²;

$S_{отпр.д}^*$ – площадь поверхности диффузно-го отражения лазерного излучения, м².

Площади поверхностей зеркального и

диффузного отражения лазерного излучения рассчитаем по формулам:

$$S_{отпр.з}^* = S_{пл} \quad (\text{при условии, что } S_{пл} < S_{отпр}); \quad (21)$$

$$S_{отпр.д}^* = S_{отпр} - S_{пл} = \pi (D_n \cdot \theta)^2 / (4 \cdot \cos \alpha) - S_{пл}, \quad (22)$$

где $S_{пл}$ – площадь поверхности отражения световозвращающей пленки или трипел-призм, попадающих в пятно лазера, м².

Подставляя формулы (21) и (22) в формулу (20) получим:

$$P_{отпр} = \frac{4 \cdot P_{из} \cdot \tau_l \cdot \tau_{cp} \cdot \cos \alpha \cdot \left\{ S_{пл} \cdot \rho_z + \left[\pi (D_n \cdot \theta)^2 / (4 \cdot \cos \alpha) - S_{пл} \right] \cdot \rho_d \right\}}{\pi (D_n \cdot \theta)^2} = P_{из} \cdot \tau_l \cdot \tau_{cp} \cdot \left\{ \frac{4 \cdot \cos \alpha \cdot S_{пл} \cdot \rho_z}{\pi (D_n \cdot \theta)^2} + \rho_d \cdot \left[1 - \frac{4 \cdot \cos \alpha \cdot S_{пл}}{\pi (D_n \cdot \theta)^2} \right] \right\}. \quad (23)$$

Полагая, что зеркально отраженное излучение полностью попадает в объектив приемного устройства ЛСАРР и площадь приемника оптического излучения не менее площади проекции пятна принимаемого лазерного

излучения, мощность излучения, попавшего на приемник излучения, Вт, рассчитаем по формуле:

$$P_c = \frac{4 \cdot P_{из} \cdot \tau_s \cdot \tau_{cp} \cdot \cos \alpha \cdot S_{ни} \cdot \rho_3 \cdot \tau_{np} \cdot \tau_{cp}}{\pi (D_n \cdot \theta)^2} + \frac{4 \cdot P_{из} \cdot \tau_s \cdot \tau_{cp} \cdot \cos \alpha \cdot \left[\pi (D_n \cdot \theta)^2 / (4 \cdot \cos \alpha) - S_{ни} \right] \cdot \rho_3 \cdot \tau_{np} \cdot \tau_{cp} \cdot (\pi \cdot d_v^2 / 4)}{\pi (D_n \cdot \theta)^2 \cdot \pi D_n^2 / (4 \cdot 2)} = \frac{4 \cdot P_{из} \cdot \tau_s \cdot \tau_{cp} \cdot \cos \alpha \cdot \left\{ S_{ни} \cdot \rho_3 + \frac{2 \cdot \left[\pi (D_n \cdot \theta)^2 / (4 \cdot \cos \alpha) - S_{ни} \right] \cdot \rho_3 \cdot d_v^2}{D_n^2} \right\}}{\pi (D_n \cdot \theta)^2} \quad (24)$$

Учитывая, что на практике $S_{ни} \cdot \rho_3 \gg \frac{2 \cdot \left[\pi (D_n \cdot \theta)^2 / (4 \cdot \cos \alpha) - S_{ни} \right] \cdot \rho_3 \cdot d_v^2}{D_n^2}$, уравнение (24) запишем в виде:

$$P_c \approx \frac{4 \cdot P_{из} \cdot \tau_s \cdot \tau_{np} \cdot \tau_{cp}^2 \cdot \cos \alpha \cdot S_{ни} \cdot \rho_3}{\pi (D_n \cdot \theta)^2} \quad (25)$$

В общем случае мощность шумов оптического излучения на входе приёмной оптической системы ЛСАРР ($P_{ш}$) зависит от мощности внутренних шумов приёмника излучения $P_{ш.пи}$ и внешних шумов $P_{ш.вн'}$ обусловленных мощностью фонового оптического излучения [17]:

$$P_{ш} = P_{ш.пи} + P_{ш.вн'} \quad (26)$$

Мощность внутренних шумов приёмника излучения $P_{ш.пи}$ Вт, рассчитаем по формуле [17]

$$P_{ш.пи} = \frac{\sqrt{S_{ни} \cdot \Delta F}}{D^*} \quad (27)$$

где $S_{ни}$ – площадь приемника оптического излучения, см²;

ΔF – эквивалентная шумовая полоса частот, Гц;

D^* – удельная обнаружительная способность приёмника излучения, (Вт/см²/Гц)⁻¹.

В качестве приемника оптического излучения в ЛСАРР используются матричные приемники.

Удельная обнаружительная способность современных приёмников излучения на основе фотодиодов составляет 10⁹ – 10¹⁵ (Вт/см²/Гц)⁻¹ [17].

Эквивалентная шумовая полоса частот ΔF для ЛСАРР, будет определяться, прежде всего частотой сдвига, которая составляет несколько десятков МГц [18]:

$$\Delta F = f_{max} = F + f_{\Delta, max} = F + \frac{2v_{max}}{\lambda} \quad (28)$$

где v_{max} – максимальная виброскорость на отражающей поверхности, мкм/с;

λ – длины волны излучения лазера, мкм;

F – частота сдвига, Гц;

$f_{\Delta, max}$ – максимальная доплеровская частота, Гц.

Значения виброскорости при громкой речи на различных отражающих поверхностях составляют от 0,1 до 44,6 мкм/с. Некоторые из этих значений приведены в табл. 5 [19].

Мощность внешних шумов ($P_{ш.вн}$), опреде-

Таблица 5

Измененные значения виброскорости при громкой речи на различных отражающих поверхностях

Частота, Гц	Уровень звукового давления, дБ	Виброскорость, мкм/с							
		Спинка кожаного кресла	Настольный календарь	Папка канцелярская	Диплом (бумага мелованная)	Бутылка стеклянная	Жалюзи вертикальные (ткань)	Внутреннее стекло стеклопакета	Лист комнатного растения
265	66	15,8	1,6	7,9	44,6	0,5	31,5	12,6	3,2
515	66	2	5	19,9	28,1	0,3	7,9	5,6	5,7
1015	61	10	5,6	2,8	5	0,3	2,8	2	5,9
2015	56	5	0,5	1,4	4	0,1	3,2	0,8	0,8
4015	53	0,2	1	1,1	1,6	0,1	1,6	0,2	1

ляемая мощностью фона оптического излучения, попавшего в поле зрения приёмника лазерного излучения, может быть рассчитана по формуле [11]

$$P_{ш.вн} \approx (B_{\lambda \phi, отр} + B_{\lambda \phi, соб}) \cdot \Omega \cdot \Delta \lambda \cdot \tau_{пр} \cdot \tau_{cp} = (B_{\phi, от} + B_{\phi, соб}) \cdot \frac{\pi \cdot d_v^2}{4 \cdot F_0 \cdot D_n} \cdot \Delta \lambda \cdot \tau_{пр} \cdot \tau_{cp} \quad (29)$$

где $B_{\phi, отр}$ – спектральная яркость поверхно-

сти, попадающей в поле зрения приёмника излучения, освещенной внешним излучением, Вт/(м² · мкм · ср);

$B_{\lambda, \text{ф.соб}}$ – спектральная яркость поверхности, попадающей в поле зрения приёмника излучения, обусловленная собственным излучением, Вт/(м² · мкм · ср);

Ω – телесный угол, под которым виден объектив приемника ЛСАПП, рад.;

$\Delta\lambda$ – диапазон длин волн, в котором работает приемник оптического излучения, мкм;

F_o – фокусное расстояние объектива приемника излучения ЛСАПП, м;

d_o – диаметр объектива приемника излучения ЛСАПП, м.

Спектральная яркость поверхности, попадающей в поле зрения приёмника излучения, освещенной внешним излучением $B_{\lambda, \text{ф.отпр}}$, Вт/(м² · мкм · ср), рассчитывается по формуле [11]

$$B_{\lambda, \text{ф.отпр}} = \frac{1}{\pi} \cdot r_{\lambda} \cdot E_{\lambda}, \quad (30)$$

где E_{λ} – спектральная освещенность поверхности на длине волны λ , Вт/(м² · мкм);

r_{λ} – спектральный коэффициент яркости поверхности на длине волны λ ;

λ – длина волны лазерного излучения, мкм.

Методика расчета спектральной освещенности поверхности E_{λ} проведена в [66].

Спектральная яркость поверхности, попадающей в поле зрения приёмника излучения, обусловленная собственным излучением $B_{\lambda, \text{ф.соб}}$, Вт/(мкм · м² · ср), рассчитывается по формуле [11]

$$B_{\lambda, \text{ф.соб}} = \frac{\varepsilon_{\lambda} \cdot C_1^*}{\lambda^5 \cdot (\exp(C_2/(\lambda \cdot T)) - 1)^2}, \quad (31)$$

где ε_{λ} – спектральный коэффициент теплового излучения поверхности на длине волны λ ;

T – температура объекта, °К.

C_1 – первая константа излучения, 3,7413 · 10⁸ Вт · мкм⁴/м²;

C_2 – вторая константа излучения, 1,4388 · 10⁴ мкм · К.

$C_1^* = C_1/\pi = 1,1908 \cdot 10^8$, Вт · мкм⁴/(м² · ср).

Величину $\Delta\lambda$, мкм, рассчитаем по формуле

$$\Delta\lambda = \frac{c}{f_o} - \frac{c}{f_o + \Delta F} = \lambda \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + \left(F + \frac{2v_{\max}}{\lambda} \right) / f_o} \right] \approx \lambda \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + F / f_o} \right], \quad (32)$$

где c – скорость распространения оптического излучения ($c = 299\,792\,458$ м/с);

λ – длина волны лазерного излучения, мкм.

f_o – частота, соответствующая длине волны лазерного излучения, Гц.

Полагая, что приемное устройство ЛСАПП работает в линейном режиме и учитывая, что шумы на выходе ЛСАПП, вызванные вибрационными шумами отражающей поверхности, значительно больше собственных шумов низкочастотного тракта ЛСАПП, с учетом формулы (1) отношение сигнал/шум на выходе ЛСАПП можно рассчитать по формуле:

$$q_i = 20 \lg \frac{u_c}{u_w} = 20 \lg \frac{k_{\text{во}} \cdot 2v_c \cdot \cos \alpha \cdot \lambda}{\lambda \cdot k_{\text{во}} \cdot 2v_w \cdot \cos \alpha} = 20 \lg \frac{v_c}{v_w} = 20 \lg \frac{a_c \cdot t}{a_w \cdot t} = a_c^* - a_w^*, \quad (33)$$

где q_i – отношение сигнал/шум в i -й октавной полосе на выходе ЛСАПП, дБ;

v_c – виброскорость отражающей поверхности, вызванная воздействием на нее акустического сигнала, мкм/с;

v_w – виброскорость отражающей поверхности, вызванная воздействием на нее внешних шумов, мкм/с;

a_c – виброускорение отражающей поверхности, вызванное воздействием на нее акустического сигнала, мкм/с²;

a_w – виброускорение отражающей поверхности, вызванное воздействием на нее внешних шумов, мкм/с²;

a_c^* – виброускорение отражающей поверхности, вызванное воздействием на нее акустического сигнала, дБ;

a_w^* – виброускорение отражающей поверхности, вызванное воздействием на нее внешних шумов, дБ.

С учетом этого допущения для расчета словесной разборчивости речи ($W_{c, \text{ом}}$) используем методику, в основу которой положен вероятностный метод оценки разборчивости речи [20, 21].

В соответствии с данной методикой расчет словесной разборчивости речи проводится в следующей последовательности [20, 21]:

1. Измеряются уровни информативного сигнала a_c^* и шума a_w^* на отражающей поверхности в точке отражения лазерного излучения, и рассчитываются отношения сигнал/шум q_i в каждой из пяти октавных полос Δf_i ($i = 2-6$), характеристики которых приведены в табл. 6:

$$q_i = a_{c,i}^* - a_{ш,i}^* \quad (34)$$

2. Рассчитывается вероятность слышимости звуков речи $P(\Delta f_i)$ в каждой из пяти октавных полос:

$$P(\Delta f_i) \approx \Phi(Q_{1,i} \cdot q_i - Q_{2,i}), \quad (35)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt$ – интеграл вероятности;

q_i – отношение сигнал/шум в i -й октавной полосе, дБ;

$Q_{1,i}$ и $Q_{2,i}$ – коэффициенты, зависящие от вида сигнала, вида шума и индивидуальных особенностей слушателей (табл. 7).

3. Рассчитываются вероятности каждой из 32-х комбинаций октавных полос A_j , в которых оператор может услышать звуки речи $P(A_j)$ (табл. 8).

4. Для каждой комбинации A_j рассчитывается словесная разборчивость речи W_j при условии, что оператор услышит звуки речи в A_j комбинации, по формуле:

$$W_j = P(A_j) \cdot P(W | A_j), \quad (36)$$

где $P(W|A_j)$ – вероятность того, что оператор правильно распознает все слова текста при условии, что он услышит звуки речи в A_j комбинации (значения $P(W|A_j)$ приведены в табл. 9).

5. Рассчитывается словесная разборчивость речи W_c по формуле:

$$W_c = \sum_{j=1}^M W_j, \quad (37)$$

где N – количество сочетаний (комбинаций) октавных полос ($N = 2^M = 32$)

M – количество октавных полос ($M = 5$).

Таблица 6

Характеристики речевого сигнала в октавных полосах

Номер полосы, i	Среднегеометрическая частота полосы, f_i , Гц	Границы октавной полосы частот, Гц	Типовые уровни речи $L_{c,i}$, измеренные на расстоянии 1 м от источника сигнала, дБ			
			$L_c = 64$	$L_c = 70$	$L_c = 76$	$L_c = 84$
1	125	90 – 175	47	53	59	67
2	250	175 – 350	60	66	72	80
3	500	350 – 700	60	66	72	80
4	1000	700 – 1400	55	61	67	75
5	2000	1400 – 2800	50	56	62	70
6	4000	2800 – 5600	47	53	59	67
7	8000	5600 – 11200	43	49	55	63

Таблица 7

Значения коэффициентов Q_1 и Q_2 в октавных полосах

Номер октавной полосы, i	Коэффициент $Q_{1,i}$	Коэффициент $Q_{2,i}$
2	0,42	- 1,24
3	0,12	- 1,43
4	0,14	- 1,20
5	0,23	- 3,32
6	0,31	- 0,54

Таблица 8

Формулы для расчета вероятности комбинаций октавных полос, в которых оператор может услышать звуки речи

Обозначение сочетания A_j	Включаемые октавные полосы f_i	Формулы для расчета вероятностей $P(A_j)$
A_0	\emptyset	$[1 - P(\Delta f_2)] \times [1 - P(\Delta f_3)] \times [1 - P(\Delta f_4)] \times [1 - P(\Delta f_5)] \times [1 - P(\Delta f_6)]$
A_1	Δf_2	$P(\Delta f_2) \times [1 - P(\Delta f_3)] \times [1 - P(\Delta f_4)] \times [1 - P(\Delta f_5)] \times [1 - P(\Delta f_6)]$
A_2	Δf_3	$[1 - P(\Delta f_2)] \times P(\Delta f_3) \times [1 - P(\Delta f_4)] \times [1 - P(\Delta f_5)] \times [1 - P(\Delta f_6)]$
A_3	Δf_4	$[1 - P(\Delta f_2)] \times [1 - P(\Delta f_3)] \times P(\Delta f_4) \times [1 - P(\Delta f_5)] \times [1 - P(\Delta f_6)]$

Обозначение сочетания A_j	Включаемые октавные полосы f_i	Формулы для расчета вероятностей $P(A_j)$
A_4	Δf_5	$[1 - P(\Delta f_2)] \times [1 - P(\Delta f_3)] [1 - P(\Delta f_4)] \times P(\Delta f_5) \times [1 - P(\Delta f_6)]$
A_5	Δf_6	$[1 - P(\Delta f_2)] \times [1 - P(\Delta f_3)] \times [1 - P(\Delta f_4)] \times [1 - P(\Delta f_5)] \times P(\Delta f_6)$
A_6	$\Delta f_2 \cup \Delta f_3$	$P(\Delta f_2) \times P(\Delta f_3) \times [1 - P(\Delta f_4)] \times [1 - P(\Delta f_5)] \times [1 - P(\Delta f_6)]$
A_7	$\Delta f_2 \cup \Delta f_4$	$P(\Delta f_2) \times [1 - P(\Delta f_3)] \times P(\Delta f_4) \times [1 - P(\Delta f_5)] \times [1 - P(\Delta f_6)]$
A_8	$\Delta f_2 \cup \Delta f_5$	$P(\Delta f_2) \times [1 - P(\Delta f_3)] \times [1 - P(\Delta f_4)] \times P(\Delta f_5) \times [1 - P(\Delta f_6)]$
A_9	$\Delta f_2 \cup \Delta f_6$	$P(\Delta f_2) \times [1 - P(\Delta f_3)] \times [1 - P(\Delta f_4)] \times [1 - P(\Delta f_5)] \times P(\Delta f_6)$
A_{10}	$\Delta f_3 \cup \Delta f_4$	$[1 - P(\Delta f_2)] \times P(\Delta f_3) \times P(\Delta f_4) \times [1 - P(\Delta f_5)] \times [1 - P(\Delta f_6)]$
A_{11}	$\Delta f_3 \cup \Delta f_5$	$[1 - P(\Delta f_2)] \times P(\Delta f_3) \times [1 - P(\Delta f_4)] \times P(\Delta f_5) \times [1 - P(\Delta f_6)]$
A_{12}	$\Delta f_3 \cup \Delta f_6$	$[1 - P(\Delta f_2)] \times P(\Delta f_3) \times [1 - P(\Delta f_4)] \times [1 - P(\Delta f_5)] \times P(\Delta f_6)$
A_{13}	$\Delta f_4 \cup \Delta f_5$	$[1 - P(\Delta f_2)] \times [1 - P(\Delta f_3)] \times P(\Delta f_4) \times P(\Delta f_5) \times [1 - P(\Delta f_6)]$
A_{14}	$\Delta f_4 \cup \Delta f_6$	$[1 - P(\Delta f_2)] \times [1 - P(\Delta f_3)] \times P(\Delta f_4) \times [1 - P(\Delta f_5)] \times P(\Delta f_6)$
A_{15}	$\Delta f_5 \cup \Delta f_6$	$[1 - P(\Delta f_2)] \times [1 - P(\Delta f_3)] \times [1 - P(\Delta f_4)] \times P(\Delta f_5) \times P(\Delta f_6)$
A_{16}	$\Delta f_2 \cup \Delta f_3 \cup \Delta f_4$	$P(\Delta f_2) \times P(\Delta f_3) \times P(\Delta f_4) \times [1 - P(\Delta f_5)] \times [1 - P(\Delta f_6)]$
A_{17}	$\Delta f_2 \cup \Delta f_3 \cup \Delta f_5$	$P(\Delta f_2) \times P(\Delta f_3) \times [1 - P(\Delta f_4)] \times P(\Delta f_5) \times [1 - P(\Delta f_6)]$
A_{18}	$\Delta f_2 \cup \Delta f_3 \cup \Delta f_6$	$P(\Delta f_2) \times P(\Delta f_3) \times [1 - P(\Delta f_4)] \times [1 - P(\Delta f_5)] \times P(\Delta f_6)$
A_{19}	$\Delta f_2 \cup \Delta f_4 \cup \Delta f_5$	$P(\Delta f_2) \times [1 - P(\Delta f_3)] \times P(\Delta f_4) \times P(\Delta f_5) \times [1 - P(\Delta f_6)]$
A_{20}	$\Delta f_2 \cup \Delta f_4 \cup \Delta f_6$	$P(\Delta f_2) \times [1 - P(\Delta f_3)] \times P(\Delta f_4) \times [1 - P(\Delta f_5)] \times P(\Delta f_6)$
A_{21}	$\Delta f_2 \cup \Delta f_5 \cup \Delta f_6$	$P(\Delta f_2) \times [1 - P(\Delta f_3)] \times [1 - P(\Delta f_4)] \times P(\Delta f_5) \times P(\Delta f_6)$
A_{22}	$\Delta f_3 \cup \Delta f_4 \cup \Delta f_5$	$[1 - P(\Delta f_2)] \times P(\Delta f_3) \times P(\Delta f_4) \times P(\Delta f_5) \times [1 - P(\Delta f_6)]$
A_{23}	$\Delta f_3 \cup \Delta f_4 \cup \Delta f_6$	$[1 - P(\Delta f_2)] \times P(\Delta f_3) \times P(\Delta f_4) \times [1 - P(\Delta f_5)] \times P(\Delta f_6)$
A_{24}	$\Delta f_2 \cup \Delta f_5 \cup \Delta f_6$	$[1 - P(\Delta f_2)] \times P(\Delta f_3) \times [1 - P(\Delta f_4)] \times P(\Delta f_5) \times P(\Delta f_6)$
A_{25}	$\Delta f_4 \cup \Delta f_5 \cup \Delta f_6$	$[1 - P(\Delta f_2)] \times [1 - P(\Delta f_3)] \times P(\Delta f_4) \times P(\Delta f_5) \times P(\Delta f_6)$
A_{26}	$\Delta f_2 \cup \Delta f_3 \cup \Delta f_4 \cup \Delta f_5$	$P(\Delta f_2) \times P(\Delta f_3) \times P(\Delta f_4) \times P(\Delta f_5) \times [1 - P(\Delta f_6)]$
A_{27}	$\Delta f_2 \cup \Delta f_3 \cup \Delta f_4 \cup \Delta f_6$	$P(\Delta f_2) \times P(\Delta f_3) \times P(\Delta f_4) \times [1 - P(\Delta f_5)] \times P(\Delta f_6)$
A_{28}	$\Delta f_2 \cup \Delta f_3 \cup \Delta f_5 \cup \Delta f_6$	$P(\Delta f_2) \times P(\Delta f_3) \times [1 - P(\Delta f_4)] \times P(\Delta f_5) \times P(\Delta f_6)$
A_{29}	$\Delta f_2 \cup \Delta f_4 \cup \Delta f_5 \cup \Delta f_6$	$P(\Delta f_2) \times [1 - P(\Delta f_3)] \times P(\Delta f_4) \times P(\Delta f_5) \times P(\Delta f_6)$
A_{30}	$\Delta f_3 \cup \Delta f_4 \cup \Delta f_5 \cup \Delta f_6$	$[1 - P(\Delta f_2)] \times P(\Delta f_3) \times P(\Delta f_4) \times P(\Delta f_5) \times P(\Delta f_6)$
A_{31}	$\Delta f_2 \cup \Delta f_3 \cup \Delta f_4 \cup \Delta f_5 \cup \Delta f_6$	$P(\Delta f_2) \times P(\Delta f_3) \times P(\Delta f_4) \times P(\Delta f_5) \times P(\Delta f_6)$

Таблица 9

**Вероятность распознавания слов для различных сочетаний октавных полос
(рассчитанная по результатам артикуляционных испытаний)**

Обозначение сочетания A_j	Включаемые октавные полосы f_i	Вероятность распознавания слов $P(W A_j)$
A_0	\emptyset	0
A_1	Δf_2	0,006
A_2	Δf_3	0,082
A_3	Δf_4	0,149
A_4	Δf_5	0,132
A_5	Δf_6	0,066
A_6	$\Delta f_2 \cup \Delta f_3$	0,302

Обозначение сочетания A_j	Включаемые октавные полосы f_i	Вероятность распознавания слов $P(W A_j)$
A_7	$\Delta f_2 U \Delta f_4$	0,435
A_8	$\Delta f_2 U \Delta f_5$	0,527
A_9	$\Delta f_2 U \Delta f_6$	0,313
A_{10}	$\Delta f_3 U \Delta f_4$	0,448
A_{11}	$\Delta f_3 U \Delta f_5$	0,781
A_{12}	$\Delta f_3 U \Delta f_6$	0,692
A_{13}	$\Delta f_4 U \Delta f_5$	0,781
A_{14}	$\Delta f_4 U \Delta f_6$	0,732
A_{15}	$\Delta f_5 U \Delta f_6$	0,675
A_{16}	$\Delta f_2 U \Delta f_3 U \Delta f_4$	0,668
A_{17}	$\Delta f_2 U \Delta f_3 U \Delta f_5$	0,864
A_{18}	$\Delta f_2 U \Delta f_3 U \Delta f_6$	0,811
A_{19}	$\Delta f_2 U \Delta f_4 U \Delta f_5$	0,882
A_{20}	$\Delta f_2 U \Delta f_4 U \Delta f_6$	0,890
A_{21}	$\Delta f_2 U \Delta f_5 U \Delta f_6$	0,705
A_{22}	$\Delta f_3 U \Delta f_4 U \Delta f_5$	0,889
A_{23}	$\Delta f_3 U \Delta f_4 U \Delta f_6$	0,887
A_{24}	$\Delta f_2 U \Delta f_5 U \Delta f_6$	0,901
A_{25}	$\Delta f_4 U \Delta f_5 U \Delta f_6$	0,906
A_{26}	$\Delta f_2 U \Delta f_3 U \Delta f_4 U \Delta f_5$	0,934
A_{27}	$\Delta f_2 U \Delta f_3 U \Delta f_4 U \Delta f_6$	0,917
A_{28}	$\Delta f_2 U \Delta f_3 U \Delta f_5 U \Delta f_6$	0,926
A_{29}	$\Delta f_2 U \Delta f_4 U \Delta f_5 U \Delta f_6$	0,927
A_{30}	$\Delta f_3 U \Delta f_4 U \Delta f_5 U \Delta f_6$	0,940
A_{31}	$\Delta f_2 U \Delta f_3 U \Delta f_4 U \Delta f_5 U \Delta f_6$	1,000

Разработанная математическая модель акустооптического канала утечки речевой информации может быть положена в основу инструментально-расчетной методики оценки эффективности защиты речевой информации от утечки по акустооптическому каналу.

Литература

- Хорев А.А. Техническая защита информации: учеб. пособие для студентов вузов. В 3-х т. Т. 1. Технические каналы утечки информации. – М.: НПЦ «Аналитика», 2008 – 436 с.
- Лысов А.В. Оптические системы зондирования акустически возбужденных поверхностей (Лазерные системы акустической разведки). – СПб.: Медиапапир, 2020. – 512 с.
- Григорьев И.А., Тупота В.И. Разработка модели оптико-электронного канала утечки акустической речевой информации//Вестник воронежского государственного технического университета. – Воронеж, 2010. – № 2. – С. 85–87.
- Авдеев В.Б., Анищенко А.В., Петигин А.Ф., Денисенко Н.Г. Методический подход к оценке дальности действия лазерного микрофона//Телекоммуникации. – Москва, 2022. - № 1. – С. 10 – 20.
- Железняк В.К., Чернова И.С. Оценка модели оптико-электронного канала утечки речевой информации// Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – Полоцк, 2015. – № 12. – С. 33–39
- Глущенко Л.А., Нырков А.П., Швед Д.В. Применение корреляционного подхода к определению качества речевой информации, зарегистрированной лазерным микрофоном//Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – С. Петербург, 2015. – № 6 (34). – С. 187–195.

7. Суворенков Д.Б., Хорев А.А., Рудченко Е.С., Савин А.Д. Анализ возможностей использования лазерных виброметров для перехвата акустической речевой информации // Международная конференция «Радиоэлектронные устройства и системы для инфотелекоммуникационных технологий – РЭУС-2020». Доклады. – М.: РНТОРЭС имени А.С.Попова. 2020. – С. 249 – 253.

8. Aufbau eines Scanning- Laservibrometers zur Visualisierung schwingender Oberflächen. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.akustik.uni-oldenburg.de/literatur/Asendorf/Tobias_Asendorf_Laservibrometer.pdf, свободный (дата обращения 12.03.2023).

9. Milena Martarelli. Exploiting the Laser Scanning Facility for Vibration Measurements. A thesis submitted to the University of London for the degree of Doctor of Philosophy. - Imperial College of Science, Technology & Medicine University of London, 2001. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/research-centres-and-groups/dynamics/40373700.PDF> (дата обращения: 12.03.2023).

10. VibroMet 500V: руководство пользователя. [Электронный ресурс] – URL: <https://t-holding.ru/docs/files/VibroMet-500V-User-Manual-Rev-60-rus-1.pdf> (дата обращения 12.03.2023).

11. Хорев А.А. Теоретические основы оценки возможностей технических средств разведки: Монография. – М.: МО РФ, 2000. – 255 с.

12. Минипризма EXTRA-SET GEOBOX. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.aspector.ru/product/mini prizma-extra-set-geobox/>. (дата обращения: 12.03.2023).

13. Трипель-призма GCL-0305. [Электронный ресурс]. – URL: <https://lasercomponents.ru/product/optika/prizmu/trippel-prizma-gcl-0305/> (дата обращения: 12.03.2023)

14. Световозвращающие пленки на полимерной основе (обзор) [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/svetovozvrashchayuschie-plenki-na-polimernoy-osnove-obzor/viewer> (дата обращения: 12.03.2023).

15. Плёночные отражатели. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.aspector.ru/category/plyonochnye-otrazhateli/> (дата обращения: 12.03.2023).

16. Отражатель пленочный ОП30/ОП50. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gsi.ru/catalog/other/op50> (дата обращения: 12.03.2023)

17. Гарнов С.В., Моисеева А.В., Носатенко П.Я., Фомин В.Н., Церевитинов А.Б. Оценка характеристик перспективного орбитального лазерного локатора для мониторинга космического мусора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://old.gpi.ru/trudiof/Vol_70/page_26_70.pdf, свободный (дата обращения: 12.03.2023).

18. Aufbau eines Scanning- Laservibrometers zur Visualisierung schwingender Oberflächen. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.akustik.uni-oldenburg.de/literatur/Asendorf/Tobias_Asendorf_Laservibrometer.pdf, свободный (дата обращения 12.03.2023).

19. Лысов А.В., Лысов В.В. Параметры типовых акустооптических модуляторов, используемых лазерными системами акустической разведки // Защита информации. Инсайд. – С. Петербург: 2020. – № 2 – С. 53 – 57.

20. Хорев А.А., Порсев И.С. Методика вероятностной оценки разборчивости речи // Защита информации. Инсайд. – С. Петербург: 2020. – № 2 – С. 44 – 52.

21. Хорев А.А., Порсев И.С. Методика вероятностной оценки разборчивости речи// XXVI Научно – практическая конференция «Комплексная защита информации» г. Минск, 25-27 мая 2021 г. – Минск: Издатель Владимир Сивчиков, 2021. – С. 53 – 58. ISBN 978-985-7030-87-3.

References

1. Khorev A.A. Tekhnicheskaya zashchita informatsii: ucheb. posobiye dlya studentov vuzov. V 3-kh t. T. 1. Tekhnicheskiiye kanaly utechki informatsii. – М.: NPTS «Analitika», 2008 – 436 s.

2. Lysov A.V. Opticheskiye sistemy zondirovaniya akusticheskiiy vozvuzhdennykh poverkhnostey (Lazernyye sistemy akusticheskoy razvedki). – SPb.: Mediapapir, 2020. – 512 s.

3. Grigor'yev I.A., Tupota V.I. Razrabotka modeli optiko-elektronnoy kanala utechki akusticheskoy rechevoy informatsii//Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – Voronezh, 2010. – № 2. – С. 85–87.

4. Avdeyev V.B., Anishchenko A.V., Petigin A.F., Denisenko N.G. Metodicheskiiy podkhod k otsenke dal'nosti deystviya lazernogo mikroфона//Telekommunikatsii. – Moskva, 2022. - № 1. – С. 10 – 20.

5. Zheleznyak V.K., Chernova I.S. Otsenka modeli optiko-elektronnoy kanala utechki rechevoy informatsii// Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nyye nauki. – Polotsk, 2015. – № 12. – С. 33–39.

6. Glushchenko L.A., Nyrkov A.P., Shved D.V. Primeneniye korrelyatsionnogo podkhoda k opredeleniyu kachestva rechevoy informatsii, zaregistrirovannoy lazernym mikrofonom//Vestnik gosudarstvennogo

universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. – S. Peterburg, 2015. – № 6 (34). – S. 187–195.

7. Surovenkov D.B., Khorev A.A., Rudchenko Ye.S., Savin A.D. Analiz vozmozhnostey ispol'zovaniya lazernykh vibrometrov dlya perekhvata akusticheskoy rechevoy informatsii // Mezhdunarodnaya konferentsiya «Radioelektronnyye ustroystva i sistemy dlya infotelekkommunikatsionnykh tekhnologiy – REUS-2020». Doklady. – M.: RNTORES imeni A.S.Popova. 2020. – S. 249 – 253.

8. Aufbau eines Scanning- Laservibrometers zur Visualisierung schwingender Oberflächen. [Electronic resource]. – Access mode: http://www.akustik.uni-oldenburg.de/literatur/Asendorf/Tobias_Asendorf_Laservibrometer.pdf, free (accessed 03/12/2023).

9. Milena Martarelli. Exploiting the Laser Scanning Facility for Vibration Measurements. A thesis submitted to the University of London for the degree of Doctor of Philosophy. - Imperial College of Science, Technology & Medicine University of London, 2001. [Electronic resource] – URL: <https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/research-centres-and-groups/dynamics/40373700.PDF> (accessed: 12.03.2023).

10. VibroMet 500V: user guide. [Electronic resource] – URL: <https://t-holding.ru/docs/files/VibroMet-500V-User-Manual-Rev-60-rus-1.pdf> (accessed 12.03.2023).

11. Khorev A.A. Teoreticheskiye osnovy otsenki vozmozhnostey tekhnicheskikh sredstv razvedki: Monografiya. – M.: MO RF, 2000. – 255 s.

12. Miniprizma EXTRA-SET GEOBOX. [Elektronnyy resurs]. – URL: <https://www.aspector.ru/product/miniprizma-extra-set-geobox/>. (data obrashcheniya: 12.03.2023).

13. Trippel'-prizma GCL-0305. [Elektronnyy resurs]. – URL: <https://lasercomponents.ru/product/optika/prizmy/trippel-prizma-gcl-0305/> (data obrashcheniya: 12.03.2023).

14. Svetovozvrashchayushchiye plenki na polimernoy osnove (obzor) [Elektronnyy resurs]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/svetovozvrashchayushchie-plenki-na-polimernoy-osnove-obzor/viewer> (data obrashcheniya: 12.03.2023).

15. Plonochnyye otrazhateli. [Elektronnyy resurs]. – URL: <https://www.aspector.ru/category/plonochnyye-otrazhateli/> (data obrashcheniya: 12.03.2023).

16. Otrazhatel' plenochnyy OP30/OP50. [Elektronnyy resurs]. – URL: <https://www.gsi.ru/catalog/other/op50> (data obrashcheniya: 12.03.2023).

17. Garnov S.V., Moiseyeva A.V., Nosatenko P.YA., Fomin V.N., Tserevitinov A.B. Otsenka kharakteristik perspektivnogo orbital'nogo lazernogo lokatora dlya monitoringa kosmicheskogo musora [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: https://old.gpi.ru/trudiof/Vol_70/page_26_70.pdf, svobodnyy (data obrashcheniya: 12.03.2023).

18. Aufbau eines Scanning- Laservibrometers zur Visualisierung schwingender Oberflächen. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.akustik.uni-oldenburg.de/literatur/Asendorf/Tobias_Asendorf_Laservibrometer.pdf, свободный (дата обращения 12.03.2023).

19. Lysov A.V., Lysov V.V. Parametry tipovykh akustoopticheskikh modulyatorov, ispol'zuyemykh lazernymi sistemami akusticheskoy razvedki // Zashchita informatsii. Insayd. – S. Peterburg: 2020. – № 2 – S. 53 – 57.

20. Khorev A.A., Porsev I.S. Metodika veroyatnostnoy otsenki razborchivosti rechi // Zashchita informatsii. Insayd. – S. Peterburg: 2020. – № 2 – S. 44 – 52.

21. Khorev A.A., Porsev I.S. Metodika veroyatnostnoy otsenki razborchivosti rechi// XKHVI Nauchno – prakticheskaya konferentsiya «Kompleksnaya zashchita informatsii» g. Minsk, 25-27 maya 2021 g. – Minsk: Izdatel' Vladimir Sivchikov, 2021. – S. 53 – 58. ISBN 978-985-7030-87-3.

ХОРЕВ Анатолий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационная безопасность», «Национальный исследовательский университет «МИЭТ». 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, МИЭТ. E-mail: horev@miee.ru

HOREV Anatoly Anatolevich, doctor of technical Sciences, Professor, head of the Department «Information security», National Research University of Electronic Technology. 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin square, house 1, MIET. E-mail: horev@miee.ru