



МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ТЕКСТОВЫХ СИМВОЛОВ НА ЗАШУМЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

В работе представлена методика экспериментальной оценки вероятности распознавания текстовых символов (букв и цифр) на зашумленных изображениях. Приведено описание специального программного обеспечения для проведения экспериментальных исследований. В результате обработки результатов экспериментальных исследований получены аналитические соотношения для расчета вероятности правильного распознавания оператором букв и цифр (шрифт – Times New Roman, кегель – 14 пунктов), выводимых на экран монитора, в зависимости от отношения сигнал/шум изображения. Также получено соотношение для расчета коэффициента улучшения отношения сигнал/шум за счет накопления (усреднения) изображений.

Ключевые слова: технический канал утечки информации, монитор, текстовые символы, зашумленное изображение, распознавание текстовых изображений.

Horev A. A.

TECHNIQUE OF ESTIMATION OF PROBABILITY OF RECOGNITION OF TEXT SYMBOLS ON NOISY IMAGES

The paper presents a method of experimental evaluation of the probability of recognition of text symbols (letters and numbers) on noisy images. The description of special software for experimental research is given. As a result of processing of results of experimental researches analytical relations for calculation of probability of the correct recognition by the operator of letters and numbers (font - Times New Roman, Kegel - 14 points) displayed on the screen of the monitor, depending on the relation a signal/noise of the image are received. The ratio for calculating

the coefficient of improvement of the signal-to-noise ratio due to the accumulation (averaging) of images is also obtained.

Keywords: technical channel of information leakage, monitor, text characters, noisy image, text image recognition.

Одним из наиболее опасных технических каналов утечки информации, обрабатываемой средствами вычислительной техники (СВТ), является канал побочных электромагнитных излучений (ПЭМИ) видеосистемы СВТ [6], что подтверждено экспериментальными исследованиями М.Г. Кюхна (рис. 1) [1].

Экспериментально установлено, что при распознавании изображений объектов вероятность правильного распознавания зависит от зашумленности изображения, числа элементов, составляющих алфавит (словарь), а также от априорной вероятности предъявляемых изображений объектов. При этом веро-



Рис. 1. Текст, перехваченный с экрана ноутбука 440CDX на расстоянии 10 м

Известно, что вероятность распознавания текстовых символов (букв и цифр) зависит от отношения сигнал/шум изображения (рис. 2 [1]).

ятность распознавания изображения объекта P_p может быть рассчитана по формуле [3, 4, 6]:

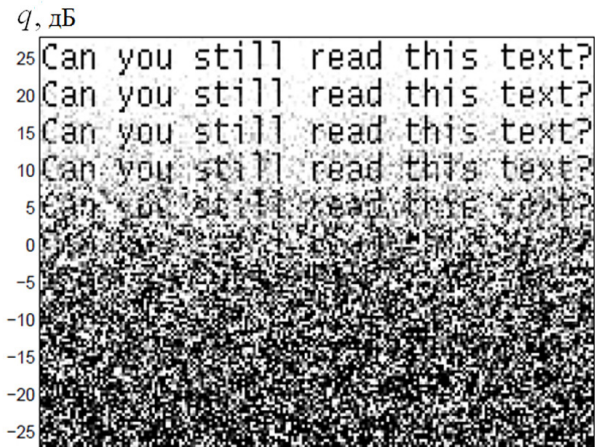
$$P_p \approx \Phi(Q_1 \cdot q - Q_2), \tag{1}$$


Рис. 2. Текстовое изображение, полученное при различных отношениях сигнал/шум (q)

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

Q_1 и Q_2 – коэффициенты, зависящие от объема априорной информации об объектах, которой располагает оператор, и его индивидуальных особенностей;

текстовых символов на зашумленных изображениях и обработки их результатов (далее – программы).

Программа разработана на языке программирования C++. Внешний вид главного окна программы представлен на рис. 3.

Программа позволяет формировать за-

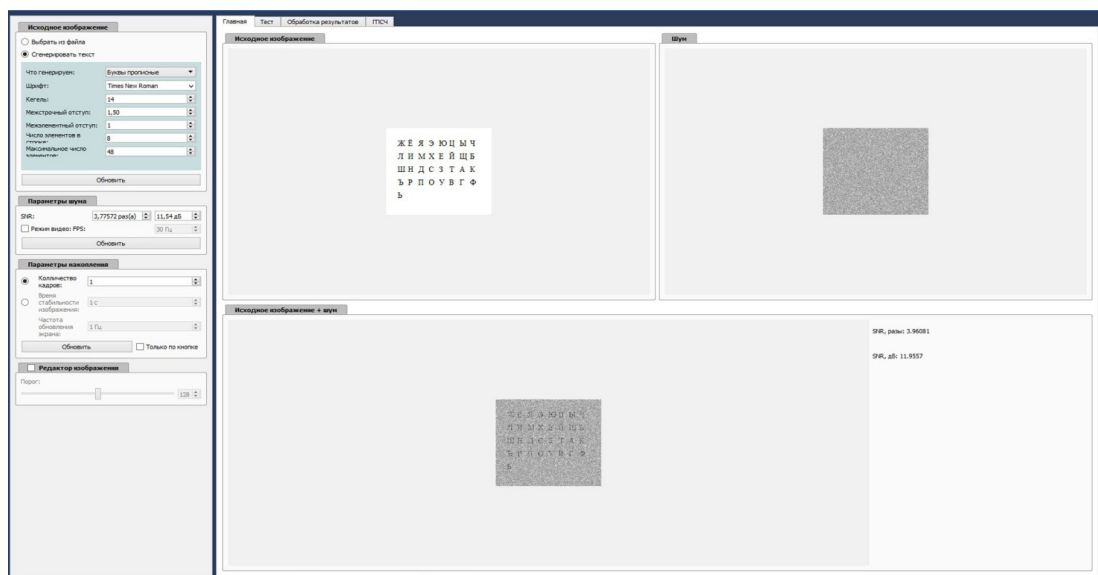


Рис. 3. Внешний вид главного окна программы для экспериментальных исследований распознавания текстовых символов на зашумленных изображениях

q – воспринимаемое зрительной системой отношение сигнал/шум.

Вороныным Ю. М. и Павловым Н. И. экспериментально установлено, что для алфавита простых фигур $Q_1 = 0,62$ и $Q_2 = 1,25$ (при алфавите размером $N = 10$) и $Q_1 = 0,60$ и $Q_2 = 0,85$ (при алфавите размером $N = 5$) [3].

Проведенный анализ доступной литературы показал, что в ней отсутствуют экспериментальные данные о вероятности распознавания операторами текстовых символов на зашумленных изображениях.

Целью данной работы является экспериментальная оценка вероятности распознавания текстовых символов на зашумленных изображениях.

Для проведения экспериментальных исследований была разработана методика, в основу которой положены требования ГОСТов Р 50948-2001, 26320-1984 и Р 50923 – 96.

Исследования проводились с использованием разработанного студентом НИУ МИЭТ Железновым Д.И. программного обеспечения для моделирования зашумленных текстовых изображений, проведения экспериментальных исследований распознавания

шумленные изображения текстовых символов с заданным отношением сигнал/шум, а также формировать изображения, полученные путем «накопления» (усреднения) кадров.

При этом оператор может установить:

- вид генерируемых текстовых символов (строчных букв, прописных букв или цифр);
- шрифт генерируемых текстовых символов;
- кегель (размер) (строчных и прописных букв и цифр);
- межстрочный и межэлементный отступы;
- число элементов (текстовых символов) в строке;
- максимальное количество элементов (текстовых символов);
- отношение сигнал/шум (SNR) в диапазоне от -40 дБ до $+40$ дБ;
- количество «накопленных» (усредненных) изображений (кадров).

Программа также позволяет оператору преобразовывать наблюдаемое изображение из формата в градациях серого в битовый формат.

В режиме тестирования (рис. 4) на экран монитора выводятся текстовые символы «рабочего алфавита» в случайной (равновероятной) последовательности. Наряду с текстовыми символами на экран также выводятся «пустые» символы, число которых устанавливает оператор. Для каждого отношения сигнал/шум генерировалось по 10 изображений.

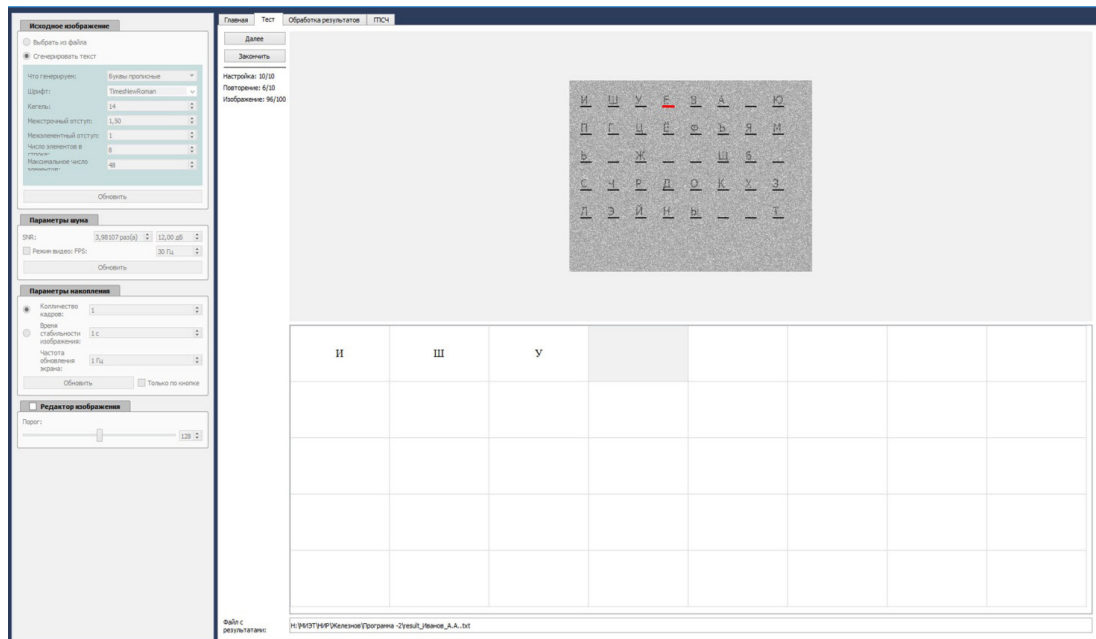


Рис. 4. Внешний вид окна программного комплекса для экспериментальных исследований распознавания текстовых символов на зашумленных изображениях в режиме «Тест»

В процессе тестирования эксперт (наблюдатель) результаты распознавания каждого символа заносил в соответствующую ячейку.

При обработке результатов тестирования рассчитывалась вероятность правильного распознавания каждого символа каждым наблюдателем и вероятность правильного распознавания каждого символа (буквы, цифры) всеми наблюдателями для каждого отношения сигнал/шум:

$$P_{j,n} = \frac{K_{j,n}}{K}; \quad (2)$$

$$P_j = \frac{\sum_{n=1}^M P_{j,n}}{M}, \quad (3)$$

где $P_{j,n}$ – вероятность правильного распознавания n-м экспертом (наблюдателем) j-го символа;

P_j – средняя вероятность правильного распознавания группой экспертов (наблюдателей) j-го символа;

$K_{j,n}$ – количество результатов правильного распознавания j-го символа символами n-м экспертом (наблюдателем);

K – количество генерируемых изображений для заданного отношения сигнал/шум (в эксперименте $K = 10$);

M – количество экспертов (наблюдателей), участвующих в эксперименте.

Учитывая, что события распознавания разных символов являются несовместными, для расчета вероятности правильного рас-

познавания всех символов, использовалась формула полной вероятности [2]:

$$P_p = \sum_{j=1}^N P_j^* \cdot P_j, \quad (4)$$

где P_p – вероятность правильного распознавания символов;

P_j^* – априорная вероятность появления j-го символа;

P_j – вероятность правильного распознавания j-го символа при его предъявлении (условная вероятность);

N – число распознаваемых символов.

За априорную вероятность появления букв была принята частота встречаемости букв в русском языке (см. табл. 1 [7]), а за априорную вероятность появления цифры – 0,1 (встречаемость цифр принята равновероятной).

Предварительный анализ полученных результатов экспериментальных исследований показал, что зависимость вероятности распознавания символов P_p от отношения сигнал/шум, измеренного в дБ, с достаточной точностью может быть аппроксимирована формулой (1).

Частота встречаемости букв русского языка

Буква	Частота встречаемости, %
а	8,01
б	1,59
в	4,54
г	1,7
д	2,98
е	8,45
ё	0,04
ж	0,94
з	1,65
и	7,35
й	1,21
к	3,49
л	4,4
м	3,21
н	6,7
о	10,97
п	2,81
р	4,73
с	5,47
т	6,26
у	2,62
ф	0,26
х	0,97
ц	0,48
ч	1,44
ш	0,73
щ	0,36
ъ	0,04
ы	1,9
ь	1,74
э	0,32
ю	0,64
я	2,01

Подбор значений коэффициентов Q_1 и Q_2 осуществлялся с помощью численных методов путем перебора всех возможных значений Q_1 и Q_2 и расчета параметра $R(Q_1, Q_2)$ по методу наименьших квадратов [5]:

$$R(Q_1, Q_2) = \sum_{i=1}^N [P_{p,q_i} - P_{p,q_i}(Q_1, Q_2)]^2, \quad (3)$$

где P_{p,q_i} – вероятность правильного распознавания символов при i -м отношении сигнал/шум (q_i), полученная экспериментально;

$P_{p,q_i}(Q_1, Q_2)$ – вероятность правильного распознавания символов при i -м отношении сигнал/шум (q_i), рассчитанная по формуле (1) при заданных значениях Q_1 и Q_2 ;

i – число отношений сигнал/шум для которых проводились экспериментальные исследования.

За значения коэффициентов Q_1 и Q_2 принимались те их значения, при которых значение параметра $R(Q_1, Q_2)$, рассчитанное по

формуле (3), было минимальным, т.е. $R(Q_1, Q_2) \rightarrow \min$.

Результаты обработки данных экспериментальных исследований представлялись в окне программы «Обработка результатов» (рис. 5).

Анализ полученных результатов, представленных в табл. 2 показывает, что рассчитанные значения коэффициентов Q_1 и Q_2 значительно больше значений этих коэффициентов, полученных Ворониным Ю. М. и Павловым Н. И. Это объясняется тем, что в экспериментах, прово-

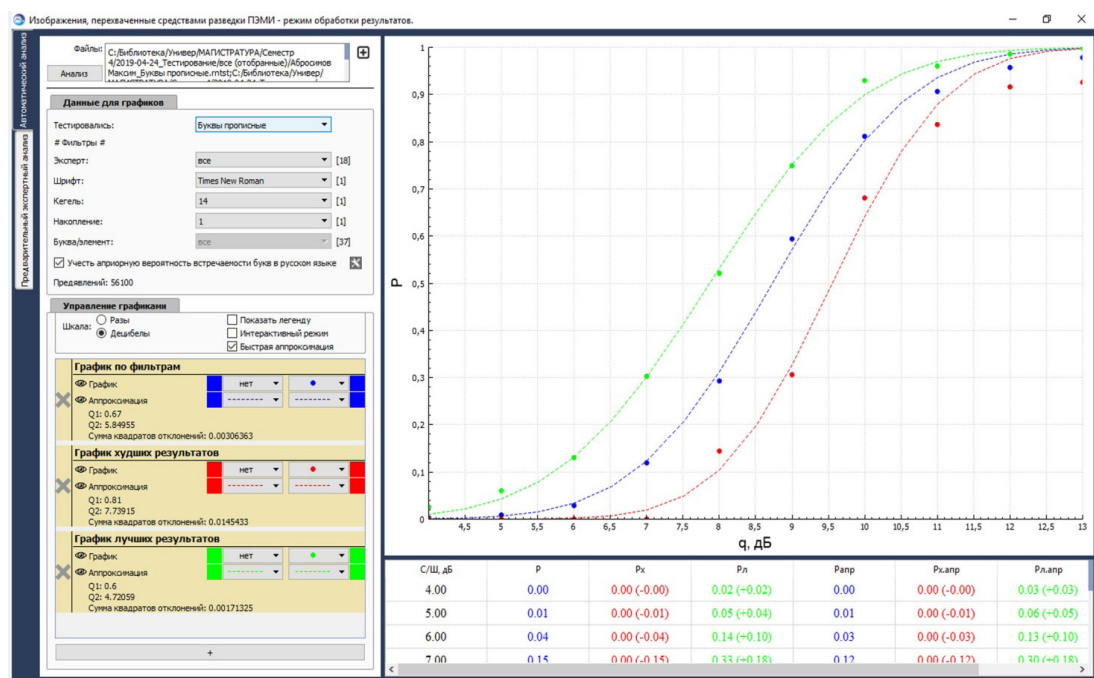


Рис. 5. Внешний вид окна программного комплекса для экспериментальных исследований распознавания текстовых символов на зашумленных изображениях в режиме «Обработка результатов»

С использованием разработанного программного обеспечения были проведены экспериментальные исследования распознавания текстовых символов (прописных и строчных букв и цифр): шрифт – Times New Roman, кегель (размер шрифта) – 14 пунктов.

Моделировались изображения с отношением сигнал/шум от 2 до 12 дБ с шагом 2 дБ (при больших значениях сигнал/шум, вероятность близка к единице, а при меньших – к нулю).

Изображения рассматривались экспертом (наблюдателем) на экране жидкокристаллического монитора Samsung S22D300HY с разрешением 1920×1080 точек.

Контрольные изображения предъявлялись эксперту (наблюдателю) в порядке от наиболее зашумленного (с низким отношением сигнал/шум) до менее зашумленных (с высоким отношением сигнал/шум).

Результаты расчетов значений коэффициентов Q_1 и Q_2 приведены в табл. 2 и 3, а графики зависимостей вероятности правильного распознавания текстовых символов от отношения сигнал/шум – на рис. 6 – 8.

Анализ полученных результатов, проводимых Ворониным Ю. М. и Павловым Н. И., проводилось распознавание простых фигур, в нашем эксперименте – сложных.

Анализ графиков (рис. 6 – 8) показывает, что вероятность распознавания символов становится менее 0,1 при отношении сигнал/шум менее 3 дБ для любых символов. Следовательно, в качестве критерия эффективности защиты информации, выводимой на экран монитора, можно использовать пороговое отношение сигнал/шум $\delta = 3$ дБ.

Для оценки отношения сигнал/шум изображения, полученного методом накопления (усреднения) изображений, был проведен эксперимент, в ходе которого для каждого из десяти отношений сигнал/шум генерировалось по двести изображений и далее формировались изображения, получаемые путем накопления (усреднения).

Анализ полученных результатов показал, что накопление (усреднение) N изображений увеличивает отношение сигнал/шум в раз $k = \sqrt{N}$ (см. рис. 9), что подтверждает выводы, полученные другими авторами.

Рассчитанные значения коэффициентов Q_1 и Q_2 (для средних значений вероятностей распознавания и значений отношений сигнал/шум, измеренных в дБ)

Вид символа	Значение коэффициента Q_1	Значение коэффициента Q_2	Значение параметра $R(Q_1, Q_2)$
Буквы прописные	0,67	5,85	0,003
Буквы строчные	0,67	6,97	0,003
Цифры	0,74	6,43	0,003

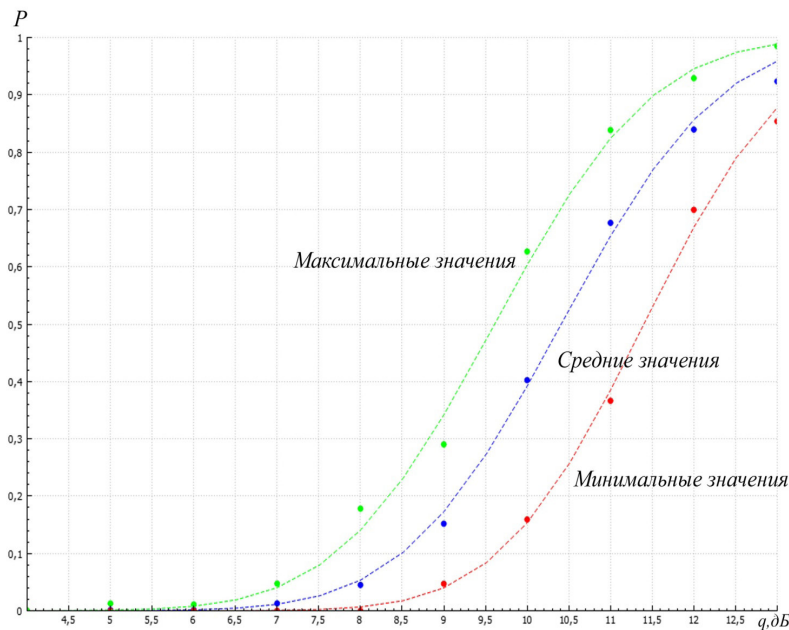


Рис. 6. Графики зависимости вероятности правильного распознавания строчных букв от отношения сигнал/шум изображения:
• — полученные по результатам экспериментальных исследований;

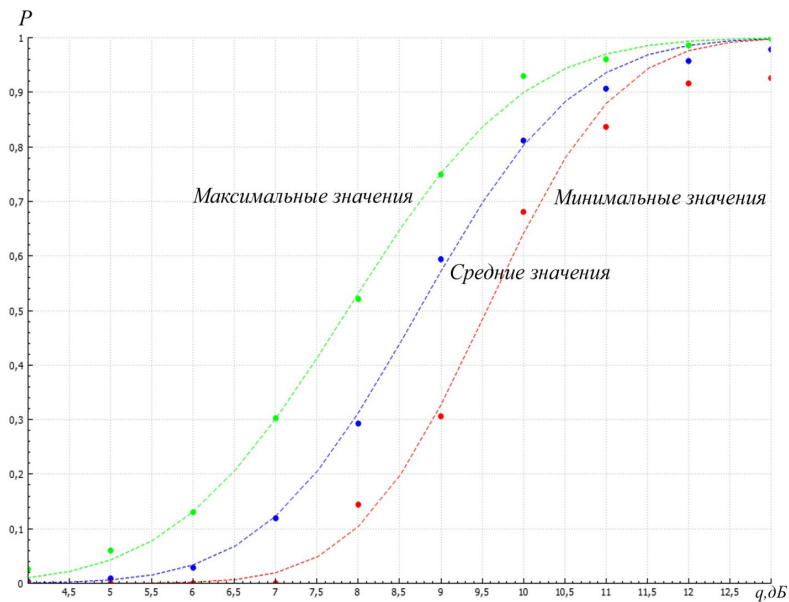


Рис. 7. Графики зависимости вероятности правильного распознавания прописных букв от отношения сигнал/шум изображения:
• — полученные по результатам экспериментальных исследований;
--- — полученные по результатам расчетов по формуле (1)

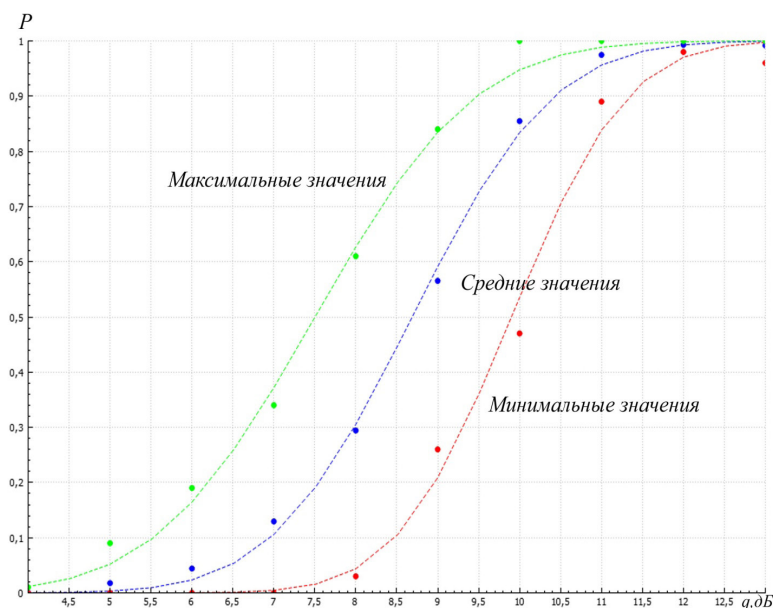


Рис.8. Графики зависимости вероятности правильного распознавания цифр от отношения сигнал/шум изображения:

- — полученные по результатам экспериментальных исследований;
- — полученные по результатам расчетов по формуле (1)

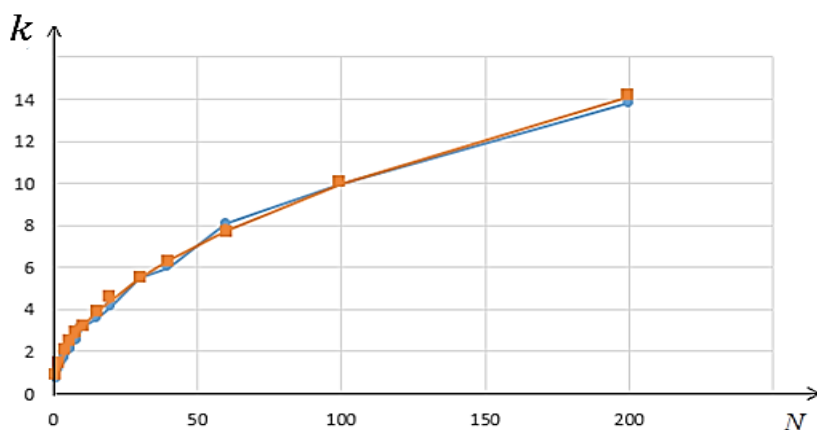


Рис. 9. Графики зависимости коэффициента улучшения отношения сигнал/шум (k) от количества усредняемых кадров (N): ● — экспериментальные значения; ■ — рассчитанные значения

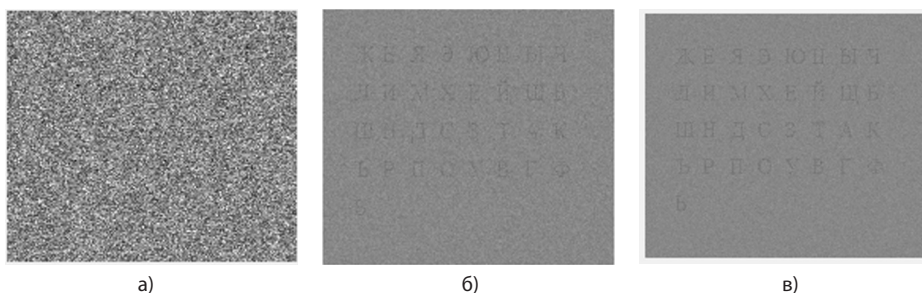


Рис. 10. Результаты усреднения тоновых изображений при отношении сигнал/шум $q = 2,56$ дБ: а) — исходное изображение ($N = 1$); б) — изображение, полученное усреднением пятидесяти кадров ($N = 50$); в) — изображение, полученное усреднением ста кадров ($N = 100$)

При усреднении нескольких десятков изображений удается прочесть текст при очень низких отношениях сигнал/шум (рис. 10 и 11).

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали, что:

- вероятность распознавания текстовых символов (букв и цифр) на зашумленных изо-

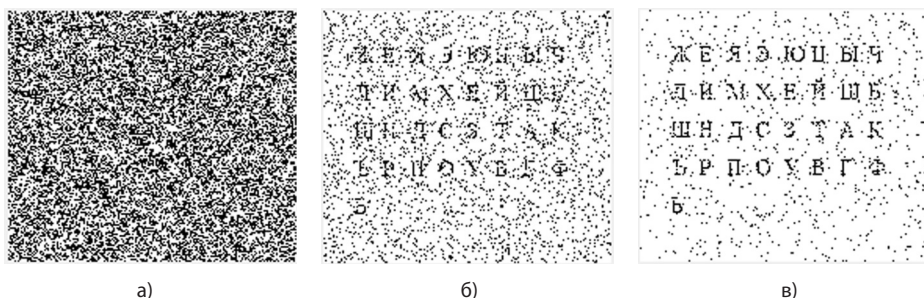


Рис. 11. Результаты усреднения битовых изображений при отношении сигнал/шум $q = 2,56$ дБ: а) – исходное изображение ($N = 1$); б) – изображение, полученное усреднением пятидесяти кадров ($N = 50$); в) – изображение, полученное усреднением ста кадров ($N = 100$)

бражениях может с высокой точностью (ошибка аппроксимации менее 0,3%) быть рассчитана по формуле: $P_p \approx \Phi(Q_1 \cdot q - Q_2)$, где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$; Q_1 и Q_2 – коэффициенты, зависящие от вида шрифта, размеров символов и индивидуальных особенностей операторов; q – отношение сигнал/шум изображения, дБ;

– при распознавании букв и цифр (шрифт – Times New Roman, кегель – 14 пунктов) значение коэффициента составляет Q_1 от 0,67 до 0,74, а коэффициента Q_2 – от 5,85 до 6,97; при накоплении (усреднении) изображений отношение сигнал/шум возрастает в раз, $k = \sqrt{N}$ где N – количество накопленных (усредненных) изображений (кадров).

Литература

1. Kuhn G. Compromising emanations: eavesdropping risks of computer displays. This technical report is based on a dissertation submitted June 2002 by the author for the degree of Doctor of Philosophy to the University of Cambridge, Wolfson College. – URL: <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-577.pdf> (дата обращения: 15.12.2019 г.)
2. Вентцель Е.С. Теория вероятности. – М.: Высш. шк., 1972. – 409 с.
3. Воронин Ю.М., Павлов Н.И. Вероятность распознавания объектов на экране монитора опико-электронной системы наблюдения// Оптиче-ский журнал. – 1994.– № 7. – С. 7 – 11.
4. Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер. с англ./ Под ред. А.И. Гор-ячева. – М.: Мир, 1978. – 414 с.
5. Метод наименьших квадратов. – URL: <https://math.semestr.ru/corel/linepar.php> (дата обра-щения: 15.12.2019 г.).
6. Хорев А.А. Техническая защита информации: учеб. пособие для студентов вузов. В 3 т. Т. 1. Технические каналы утечки информации. – М.: НПЦ «Аналитика», 2008. – 436 с.
7. Частота букв в русском языке. – URL: <http://spectator.ru/entry/1041> (дата обращения: 15.12.2019 г.).

References

1. Kuhn G. Compromising emanations: eavesdropping risks of computer displays. This technical report is based on a dissertation submitted June 2002 by the author for the degree of Doctor of Philosophy to the University of Cambridge, Wolfson College. – URL: <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-577.pdf> (data obrashcheniya: 15.12.2019 g.)
2. Venttsel' 409 s. – M.: Vyssh. shk., 1972. – Ye.S. Teoriya veroyatnosti.
3. Voronin YU.M., Pavlov N.I. Veroyatnost' raspoznavaniya ob'yektov na ekrane monitora optiko-elektronnoy sistemy nablyudeniya// Opticheskiy zhurnal. – 1994.– № 7. – S. 7 – 11.
4. 414 s. – M.: Mir, 1978. – Lloyd Dzh. Sistemy teplovideniya: Per. s ang./ Pod red. A.I. Goryacheva.
5. Metod naimen'shikh kvadratov. – URL: <https://math.semestr.ru/corel/linepar.php> (data obrashcheniya: 15.12.2019 g.).
6. Khorev A.A. Tekhnicheskaya – M.: NPTS «Analitika», 2008. – zashchita informatsii: ucheb. posobiye dlya studentov vuzov. V 3 t. T. 1. Tekhnicheskiye kanaly utechki informatsii. 436 s.
7. Chastota bukv v russkom yazyke. – URL: <http://spectator.ru/entry/1041> (data obrashcheniya: 15.12.2019 g.).

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

HOREV Anatoly Anatolyevich, 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