

Маркович Игорь Ильич – e-mail: marko@sfedu.ru; тел.: +78634394055; к.т.н.; с.н.с., директор – главный конструктор.

Паньчев Андрей Иванович – Южный федеральный университет, e-mail: aipanychev@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

Zavtur Evgeny Evgenevich – Research and Design Bureau of Digital Signal Processing Southern Federal University; e-mail: zavtur90@mail.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634393075; designer of the 1st category.

Markovich Igor P'ich – e-mail: marko@sfedu.ru; phone: +78634394055; cand. of eng. sc.; senior fellow; director – chief designer.

Panychev Andrey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: aipanychev@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; the department of antennas and radio transmitters; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.067

DOI 10.23683/2311-3103-2018-8-173-181

Ю.А. Брюхомицкий, В.М. Федоров

МЕТОД ТЕКСТОНЕЗАВИСИМОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ ПО ГОЛОСУ

Предлагается иммунологический метод решения задачи текстонезависимой идентификации личности по голосу, основанный на принципах представления и обработки речевой информации, принятых в искусственных иммунных системах. Для идентификации личности по голосу используется модель Фанта, в которой, речевой сигнал образуется путем прохождения через фильтр высокого порядка. В качестве векторов признаков используются кепстральные коэффициенты, полученные на основе линейного предсказателя речи. Последующий анализ векторов признаков осуществляется на основе аппарата искусственных иммунных систем с использованием иммунологической модели отрицательного отбора. Модель реализует децентрализованное распознавание последовательно идущих фрагментов речи, путем их сопоставления со специальными, предварительно созданными распознающими элементами – детекторами, имитирующими иммунокомпетентные клетки иммунной системы. Сопоставление осуществляется с использованием меры близости Евклида по принципу негативной селекции. Принятие решения «свой»-«чужой» при анализе речевого сигнала реализуется на основе статистического подхода по частоте срабатывания детекторов. Метод прошел экспериментальную проверку в среде MATLAB, которая показала его работоспособность и эффективность. Метод предназначен для непрерывного аутентификационного контроля личности говорящего в темпе поступления голосовых данных при воспроизведении текста произвольного объема и содержания, что позволяет своевременно принимать решение о возможной подмене дикторов. Преимуществом метода является его полная защищенность от атак воспроизведения. Эффективная реализация метода, повышение его точности тесно связаны с возможностью организации параллельных вычислений больших объемов данных, обусловленных размерами анализируемых текстов и размерами популяции детекторов. Это обстоятельство обуславливает перспективу применения многопроцессорных вычислительных систем высокой производительности.

Текстонезависимая идентификация личности по голосу; кепстральный анализ; линейный предсказатель речевого сигнала; искусственные иммунные системы; модель отрицательного отбора.

Yu.A. Bryuhomitsky, V.M. Fedorov

METHOD OF TEXT-INDEPENDENT PERSONALITY IDENTIFICATION BY VOICE

An immunological method is proposed for solving the problem of text-independent identification of a person by voice, based on the principles of presentation and processing of voice information accepted in artificial immune systems. For personality identification by its voice, a Fanta model is used in which the voice signal is formed by passing through a high-order filter. Cepstral coefficients obtained on the basis of a linear speech predictor are used as feature vectors. The following analysis of the feature vectors is carried out on the basis of the apparatus of artificial immune systems using an immunological model of negative selection. The model implements decentralized recognition of sequentially reaching speech fragments by comparing them with special, previously created recognition elements — detectors which imitate the immune-competent cells of the immune system. The matching is carried out using the Euclidean proximity measure according to the principle of negative selection. During the speech signal analysis, the decision "well-known/stranger" is making based on a statistics of detectors response frequency. The method has been experimentally tested in IDE MATLAB and showed its effectiveness. The method is intended for continuous authentication control of the speaker's identity at the rate of voice data income when text of arbitrary size and content is reproduced. It allows making a timely decision about the possible substitution of speakers. The advantage of the method is its complete protection from replay attacks. Effective implementation of the method, its increasing accuracy are closely related to the possibility of organizing the parallel calculations of large amounts of data, due to the size of the analyzed text and the size of detectors population. This circumstance determines the perspective of using high-performance multiprocessor computing systems.

Text-independent identification by voice; cepstral analysis; linear speech signal predictor; artificial immune systems; negative selection model.

Введение. Исследования и разработки систем идентификации личности по голосу ведутся уже около 50 лет и остаются актуальными по настоящее время. Интерес к проблеме идентификации личности по голосу обусловлен, прежде всего, преимуществами такого способа проверки подлинности личности: голос невозможно украсть и очень трудно подделать, в процессе идентификации не требуется непосредственный контакт с пропускной системой. Голосовая идентификация личности может применяться при контроле прав доступа как к физическим, так и информационным объектам. Большие перспективы применения таких систем в телефонии, электронной коммерции, криминалистике, разведке и контрразведке, антитеррористическом мониторинге, системах голосового управления и многих других областях.

Большинство систем идентификации личности по голосу ориентированы на использование заранее обусловленных коротких фраз, выступающих в роли голосового пароля [1–5]. Они просты в реализации, обладают приемлемой для некоторых приложений точностью, но весьма уязвимы для атак воспроизведения злоумышленником предварительно подслушанного или записанного пароля. Кроме того, в таких системах является обязательной процедура предварительной регистрации голосового пароля личности в системе. Особую группу составляют системы голосовой идентификации, которые обеспечивают идентификацию личности при воспроизведении ею любого текста на любом языке (текстнезависимые голосовые системы) [6–8]. Они защищены от атак воспроизведения, но существенно сложнее в реализации, требуют больших затрат процессорного времени для проведения процедуры идентификации и обладают существенно меньшей точностью идентификации.

Постановка задачи. Для идентификации личности по голосу используется модель Фанта [9], в которой, речевой сигнал образуется путем прохождения через фильтр высокого порядка. В качестве векторов признаков используются кепстральные коэффициенты, полученные на основе линейного предсказателя речи. Последующий анализ векторов признаков осуществляется на основе аппарата искусственных иммунных систем (ИИС) [10–12] с использованием иммунологической модели отрицательного отбора (МОО) [13, 14]. Модель реализует децентрализованное распознавание последовательно идущих фрагментов речи, путем их сопоставления со специальными, предварительно созданными распознающими элементами – детекторами, имитирующими иммунокомпетентные клетки иммунной системы. Сопоставление осуществляется по принципу негативной селекции (срабатывание детектора свидетельствует о том, что предъявленный фрагмент отсутствует в голосовом эталоне данной личности).

Решение поставленной задачи. В данной работе в качестве базовой используется голосовая модель, предложенная Фантом [9]. В этой модели речевой сигнал образуется путем прохождения через фильтр высокого порядка, который возбуждается либо последовательностью периодических импульсов, в результате чего получаются гласные, а также звонкие или сонорные согласные звуки, либо случайным шумом с широким спектром, – в результате получаются глухие согласные звуки.

С позиции гомоморфных систем [15, 16] речевой сигнал рассматривается как суперпозиция возбуждающего сигнала (т. е. периода основного тона) и сигнала, накладывающегося на него при прохождении через речевой тракт [9]. В этом случае речевой сигнал $s(n), n = 0, 1, \dots$ можно представить в виде свертки в следующем виде:

$$s(n) = d(n) \otimes v(n),$$

где n – временные точки отсчета речевого сигнала;

$d(n)$ – возбуждающий сигнал;

$v(n)$ – импульсный отклик речевого тракта;

\otimes – операция свертки.

В частотной области свертка имеет вид:

$$S(\omega) = D(\omega) \cdot V(\omega).$$

Если взять комплексный логарифм данного равенства, получим:

$$\log[D(\omega) \cdot V(\omega)] = \log[D(\omega)] + \log[V(\omega)].$$

Из данного выражения следует, что в логарифмической области период основного тона и параметры голосового тракта наложены друг на друга и могут быть разделены с помощью обычных методов обработки сигнала.

В качестве векторов признаков голоса предлагается использовать кепстральные коэффициенты. В большинстве случаев кепстральные коэффициенты вычисляются с помощью преобразования Фурье [16]. Данный метод характеризует высокую скорость вычисления коэффициентов, благодаря использованию алгоритмов быстрого преобразования Фурье. Однако при использовании этого метода проявляется чувствительность к фоновым шумам и нестабильность получаемых коэффициентов, что вызывает сильное перекрытие параметров разных речевых сигналов в векторном пространстве признаков [17]. Для устранения этих недостатков для получения кепстральных коэффициентов предлагается использовать линейное предсказание речи [17], которое относится к классу методов параметрического моделирования, в котором спектр моделируется как авторегрессионный процесс.

Модель речевого сигнала $s(n)$ в этом случае представляется как линейная комбинация его предыдущих отсчетов:

$$s(n) = - \sum_{i=1}^{N_{LP}} a_{LP}(i) \cdot s(n-i) + e(n),$$

где N_{LP} – число коэффициентов модели (порядок предсказания);

a_{LP} – коэффициенты линейного предсказания;

$e(n)$ – функция ошибки модели (разность между предсказанным и реально измеренным значением).

Выражение может быть переписано в виде z -преобразования и представлено как операция линейной фильтрации:

$$E(z) = H_{LP}(z) \cdot S(z),$$

где $E(z)$ и $S(z)$ – z -преобразование сигнала ошибки и речевого сигнала соответственно, а

$$H_{LP}(z) = \sum_{i=1}^{N_{LP}} a_{LP}(i) \cdot z^{-i}, \quad a_{LP}(0) \equiv 1,$$

где $a_{LP}(0) \equiv 1$, называется инверсным фильтром линейного предсказания.

Имеется несколько методов вычисления коэффициентов линейного предсказания. В данной работе использован авторегрессионный метод [9], что связано с его вычислительной эффективностью и присущей ему стабильностью получаемых коэффициентов.

Для вычисления коэффициентов предсказания использована рекурсия Левинсона-Дарбина [9]. Если фильтр линейного предсказания стабилен (а стабильность его гарантируется при автокорреляционном методе), то логарифм обратного фильтра может быть выражен как энергетический ряд [16]:

$$C_{LP} = \sum_{i=1}^{N_{LP}} a_{LP}(i) \cdot z^{-i} = \log(C_{LP} / \sum_{j=1}^{N_{LP}} a_{LP}(j) \cdot z^{-j}).$$

Кепстральные коэффициенты находятся путем дифференцирования обеих сторон выражения относительно z^{-1} и вычислением их из полученных полиномов. Это делается с помощью следующей рекурсии [9]:

Инициализация:

$$C_{LP}(1) = -a_{LP}(1)$$

for($i = 2; i \leq N_C; i++$)

{

$$C_{LP} = -a_{LP}(i) - \sum_{j=1}^{i-1} \left(1 - \frac{j}{i}\right) \cdot a_{LP}(j) \cdot C_{LP}(i-j)$$

}

Здесь $a_{LP}(i)$ – коэффициенты линейного предсказания, $C_{LP}(i)$ – кепстральные коэффициенты.

При вычислении кепстральных коэффициентов на основе приведенной выше рекурсии не указывается значение N_C , определяющее их количество. Проблема заключается в том, что они являются результатом обратного Фурье-преобразования импульсного отклика модели линейного предсказания. Однако

модель линейного предсказания сигнала является фильтром с бесконечной импульсной характеристикой. Следовательно, теоретически можно вычислить бесконечное число кепстральных коэффициентов. На практике число кепстральных коэффициентов выбирается сравнимым с числом коэффициентов линейного предсказания: $0,75N_{LP} < N_C < 1,25N_{LP}$ где N_{LP} – число коэффициентов линейного предсказания. В данной работе принято $N_C = N_{LP}$.

Дальнейшее решение задачи текстонезависимой идентификации личности по голосу строится на основе анализа кепстральных коэффициентов с помощью аппарата ИИС [10–12].

Исследования в области клавиатурной биометрии личности [18], показали, что индивидуальные особенности клавиатурного воспроизведения текста в большей степени проявляются при воспроизведении не одиночных символов, а морфемно обусловленных фрагментов текста. Использование этого феномена позволяет строить системы динамической биометрической идентификации личности с существенно более высокими характеристиками по точности.

В предположении, что аналогичный феномен свойственен и голосовой биометрии, речевой сигнал с удаленными паузами и шипящими звуками $s(n), n = 0, 1, \dots$ разбивается на временные участки (фрагменты) $\{\mathbf{s}_i\}_{i=1}^r$ одинакового размера по r отсчетов в каждом фрагменте. При этом каждый фрагмент представляется r -мерным вектором признаков в пространстве E^r :

$$\mathbf{s}_i = s_1, s_2, \dots, s_r, \quad i = 1, 2, \dots, r,$$

а весь речевой сигнал $s(n)$ – последовательностью векторов \mathbf{s}_i :

$$s(n) \equiv \{\mathbf{s}_i\}_{i=1}^{\infty} = \mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots$$

Размерность r векторов признаков \mathbf{s}_i соответствует числу N_{LP} кепстральных коэффициентов C_{LP} . В проведенных исследованиях $r = 24$. Минимальное $(C_{LP})_{min}$ и максимальное $(C_{LP})_{max}$ значения кепстральных коэффициентов определяют рабочее подпространство $E_p^r \subset E^r$, в котором распределены векторы признаков \mathbf{s}_i .

При распознавании голоса в режиме верификации (разделение голосовых данных на 2 класса: «свой» и «чужие») последовательность $\{\mathbf{s}_i\}_{i=1}^{\infty}$, ограниченная N_s элементами трактуется как голосовой эталон \mathbf{S} данной личности (диктора):

$$\mathbf{S} = \{\mathbf{s}_i\}_{i=1}^{N_s} = \mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_{N_s}, \quad i = 1, 2, \dots, N_s.$$

В отличие от классических методов распознавания образов, основанных на сопоставлении образов с эталоном, предлагается использовать иммунологическую модель отрицательного отбора (МОО), которая реализует децентрализованное распознавание образов, путем их сопоставления с распознающими элементами – детекторами. Сопоставление осуществляется по принципу негативной селекции (срабатывание детектора свидетельствует о том, что предъявленный образ существенно отличается от эталона) [13, 14].

Детекторы имитируют иммунокомпетентные клетки, которые отвечают за распознавание специфических «чужих», т. е. не известных иммунной системе молекул (антигенов).

Популяция детекторов \mathbf{D} создается в виде векторов \mathbf{d}_j в метрике векторов \mathbf{s}_i :

$$\mathbf{D} = \{\mathbf{d}_j\} = \mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_{N_d}, \quad j = 1, 2, \dots, N_d;$$

$$\mathbf{d}_j = d_1, d_2, \dots, d_{N_d}.$$

Для распознавания «чужих» детекторы \mathbf{d}_j должны быть представлены векторами признаков, отличающимися от векторов признаков эталона \mathbf{s}_i на некоторую заданную величину δ_0 .

Простейший способ создания детекторов \mathbf{d}_j популяции \mathbf{D} состоит из двух фаз. В первой фазе осуществляется случайная генерация кандидатов в детекторы $\dot{\mathbf{d}}_j$, равномерно распределенных в пространстве E_p^r . Во второй фазе кандидаты $\dot{\mathbf{d}}_j$ сопоставляются с векторами \mathbf{s}_i эталона \mathbf{S} на основе меры близости Евклида:

$$\delta(\mathbf{s}_i, \dot{\mathbf{d}}_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^r (s_{ik} - \dot{d}_{jk})^2}.$$

Если $\delta(\mathbf{s}_i, \dot{\mathbf{d}}_j) > \delta_0$, то кандидат $\dot{\mathbf{d}}_j$ приобретает статус детектора \mathbf{d}_j , в противном случае кандидат $\dot{\mathbf{d}}_j$ уничтожается. По этой процедуре формируется популяция $\mathbf{D} = \{\mathbf{d}_j\} = \mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_{N_D}$ из N_d детекторов. Останов процедуры может задаваться различными критериями, например временем обучения; числом итераций; размером популяции; предельно допустимым числом неэффективных итераций, не добавляющих новых детекторов. В представленных исследованиях останов процедуры создания популяции \mathbf{D} задавался простым ограничением числа детекторов популяции N_d .

Создание популяции $\mathbf{D} = \{\mathbf{d}_j\}$ детекторов завершает фазу обучения ИИС.

В фазе распознавания фрагменты \mathbf{s}_i анализируемого голосового сигнала $s(n)$, представленного последовательностью $\{\mathbf{s}_i\}_{i=1}^{\infty}$, сопоставляются с детекторами \mathbf{d}_j популяции $\mathbf{D} = \{\mathbf{d}_j\}$ с использованием меры близости Евклида между векторами \mathbf{s}_i и \mathbf{d}_j :

$$\delta(\mathbf{s}_i, \mathbf{d}_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^r (s_{ik} - d_{jk})^2}.$$

Критический уровень близости $\delta(\mathbf{s}_i, \mathbf{d}_j) = \delta_0$ определяет границу для принятия системой решения «свой/чужой» и задается, исходя из допустимых ошибок первого и второго рода.

Если для некоторой пары \mathbf{s}_i и \mathbf{d}_m $\delta(\mathbf{s}_i, \mathbf{d}_m) < \delta_0$, то считается, что фрагмент \mathbf{s}_i анализируемого голоса, представленного последовательностью $\{\mathbf{s}_i\}_{i=1}^{\infty}$ отсутствует в эталоне \mathbf{S} и с большой вероятностью принадлежит «чужому».

Существенные вариации параметров голоса в последовательностях $\{\mathbf{s}_i\}_{i=1}^{\infty}$ и значительные размеры самих последовательностей определяют целесообразность применения статистического подхода для принятия ИИС решения «свой»-«чужой» [19, 20]. При таком подходе контролируется частота f выполнения условия $\delta(\mathbf{s}_i, \mathbf{d}_j) < \delta_0$, которая определяет статистическую вероятность $\hat{P}^ч$ принадлежности анализируемого голоса «чужому»:

$$\hat{P}^ч \approx f = n_{\delta}^+ / n_{\delta},$$

где n_{δ}^+ число случаев выполнения условия $\delta(\mathbf{s}_i, \mathbf{d}_j) < \delta_0$ в n_{δ} проведенных операциях сопоставлений \mathbf{s}_i с \mathbf{d}_i .

Принятие решения о принадлежности анализируемого голоса $s(n)$ «чужому» считается обоснованным, при превышении частоты f заданного порогового значения f_n :

$$s(n) \equiv \begin{cases} s(n)^c, & \text{если } f < f_n; \\ s(n)^ч, & \text{если } f \geq f_n, \end{cases}$$

где $s(n)^c$ – голосовой сигнал «своего»; $s(n)^ч$ – голосовой сигнал «чужого».

В качестве платформы для проведения исследований использовался пакет прикладных программ MATLAB версии 10. Для записи звука использовалась встроенная в материнскую плату звуковая карта и микрофон. Речевой сигнал

оцифровывался с частотой дискретизации 44100 Гц и размером одного отсчета 16 бит моно. Предварительно из речевого сигнала удалялись паузы и шипящие звуки. Затем речевой сигнал разбивался на участки по 20 мсек с перекрытием 5 мсек. На каждом участке вычислялись вектора признаков s_i .

Экспериментальные исследования проводились для 9 дикторов, из которых один диктор представлял «своего» и 8 дикторов представляли «чужих». Результаты распознавания голосов дикторов предварительно обученной ИИС представлены на графике (рис. 1).

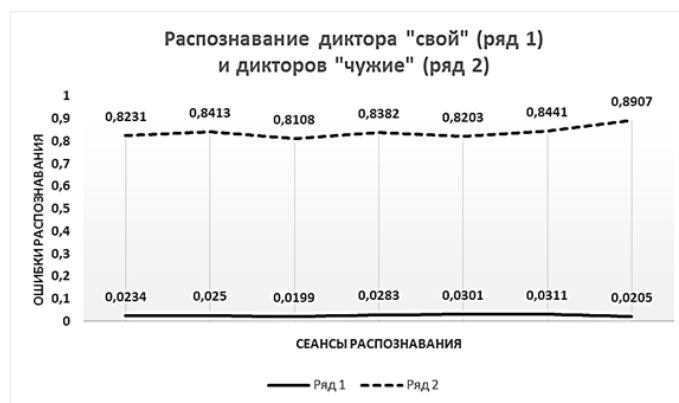


Рис. 1. Результаты распознавания голосов дикторов

Заключение. В работе предложен новый – иммунологический метод текстонезависимой идентификации личности по голосу и доказана его работоспособность на основе экспериментальных исследований. Метод предназначен для непрерывного аутентификационного контроля личности говорящего в темпе поступления голосовых данных при воспроизведении текста произвольного объема и содержания, что позволяет своевременно принимать решение о возможной подмене дикторов. Преимуществом метода является его полная защищенность от атак воспроизведения.

Следует ожидать, что полученные в работе экспериментальные ошибки предложенного метода могут быть существенно снижены при использовании более качественной звукозаписывающей аппаратуры, условий звукозаписи и после уточнения ряда использованных в ИИС эмпирических параметров.

Предложенный метод, по существу, реализует распределенные вычисления, свойственные иммунной системе. Поэтому эффективная реализация метода, повышение его точности тесно связаны с возможностью организации параллельных вычислений больших объемов данных, обусловленных размерами анализируемых текстов и размерами популяции детекторов. Это обстоятельство обуславливает перспективу применения многопроцессорных вычислительных систем высокой производительности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kenny P., Ouellet P., Dehak N., et al.* A study of interspeaker variability in speaker verification // IEEE Trans. Audio Speech Language Processing. – 2008. – Vol. 16, Iss. 5. – P. 980-988.
2. *Zhang Sh.-X, Mak M.-W.* A new adaptation approach to high-level speaker-model creation in speaker verification // Speech Communication. – 2009. – Vol. 51. – P. 534-550.
3. *Первушин Е.А.* Обзор основных методов распознавания дикторов // Математические структуры и моделирование. – 2011. – Вып. 24. – С. 41-54.

4. *Гришин В.М., Калашиников Д.М.* Речевой фрагментатор для нейросетевого биометрического вокодера // Пенза-2012. Труды научно-технической конференции кластера пензенских предприятий, обеспечивающих безопасность информационных технологий. – <http://пниэи.рф/activity/science/БИТ/Т8-p73.pdf>.
5. *Lei Y., Hansen J. H.L.* Mismatch modeling and compensation for robust speaker verification // *Speech Communication*. – 2011. – Vol. 53. – P. 257-268.
6. *Макаревич О.Б., Юрков П.Ю., Федоров В.М.* Применение рекуррентных нейронных сетей для текстонезависимой идентификации диктора // Сб. трудов «Информационная безопасность». – Таганрог, 2002. – С. 200-201.
7. *Макаревич О.Б., Бабенко Л.К., Федоров В.М., Юрков П.Ю.* Текстонезависимая аутентификация/идентификация по голосу в системах управления доступом // X Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы информационной безопасности в системе высшей школы». – М.: МИФИ, 2003. – С. 28-29.
8. *Bimbot F. et al.* A Tutorial on Text-Independent Speaker Verification // *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*. – 2004. – No. 4. – P. 430-451.
9. *Фант Г.* Акустическая теория речеобразования. – М.: Наука, 1964. – 283 с.
10. *Dasgupta D.* Artificial Immune Systems and Their Applications, Ed., Springer-Verlag, 1999.
11. *De Castro L.N., Timmis, J.I.* Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach, London: Springer-Verlag, 2000. – 357 p.
12. Искусственные иммунные системы и их применение / под ред. Д. Дасгупты: пер. с англ. А.А. Романюхи. – М.: Физматлит, 2006. – 344 с.
13. *Dasgupta D., Forrest S.* Tool breakage detection in milling operations using a negative-selection algorithm // Technical report CS95-5, Department of computer science, University of New Mexico, 1995.
14. *Forrest S., Perelson A.S., Allen L., Cherukuri R.* Self-nonsel self discrimination in a computer // In: Proc. of Ieee symposium on research in security, Oakland, CA, 16-18 May 1994. – P. 202-212.
15. *Опенгейм А.В., Шафер Р.В.* Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. / под ред. С.Я. Шаца. – М.: Связь, 1979. – 416 с.
16. *Рабинер Л.Р., Шафер Р.В.* Цифровая обработка речевых сигналов: пер. с англ. / под ред. М.В. Назарова, Ю.Н. Прохорова. – М.: Радио и связь, 1981. – 495 с.
17. *Маркел Дж., Грэй А.Х.* Линейное предсказание речи: пер. с англ. / под ред. Ю.Н. Прохорова, В.С. Звездина. – М.: Связь, 1980. – 308 с.
18. *Брюхомицкий Ю.А.* Иммунологический подход к организации клавиатурного мониторинга // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 2 (151). – С. 33-41.
19. *Брюхомицкий Ю.А.* Иммунологический метод верификации рукописи с использованием векторного представления данных // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 9 (182). – С. 50-57.
20. *Брюхомицкий Ю.А.* Иммунологический подход к идентификации личности по динамическим биометрическим параметрам // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 5 (190). – С. 56-66.

REFERENCES

1. *Kenny P., Ouellet P., Dehak N., et al.* A study of interspeaker variability in speaker verification, *IEEE Trans. Audio Speech Language Processing*, 2008, Vol. 16, Iss. 5, pp. 980-988.
2. *Zhang Sh.-X., Mak M.-W.* A new adaptation approach to high-level speaker-model creation in speaker verification, *Speech Communication*, 2009, Vol. 51, pp. 534-550.
3. *Pervushin E.A.* Obzor osnovnykh metodov raspoznavaniya diktorov [Review of the main methods of speaker recognition], *Matematicheskie struktury i modelirovanie* [Mathematical structures and modeling], 2011, Issue 24, pp. 41-54.
4. *Grishin V.M., Kalashnikov D.M.* Rechevoy fragmentator dlya neyrosetevogo biometricheskogo vokodera [Speech fragment for neural network biometric vocoder], *Penza-2012. Trudy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii klastera penzenskikh predpriyatiy, obespechivayushchikh bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy* [Penza-2012. Proceedings of the scientific and technical conference cluster Penza enterprises, ensuring the security of information technology]. Available at: <http://пниэи.рф/activity/science/БИТ/Т8-p73.pdf>.
5. *Lei Y., Hansen J. H.L.* Mismatch modeling and compensation for robust speaker verification, *Speech Communication*, 2011, Vol. 53, pp. 257-268.

6. *Makarevich O.B., Yurkov P.Yu., Fedorov V.M.* Primenenie rekurrentnykh neyronnykh setey dlya tekstonezavisimoy identifikatsii diktora [Application of recurrent neural networks for text-independent speaker identification], *Sb. trudov «Informatsionnaya bezopasnost'»* [Proceedings "Information security"]. Taganrog, 2002, pp. 200-201.
7. *Makarevich O.B., Babenko L.K., Fedorov V.M., Yurkov P.Yu.* Tekstonezavisimaya autentifikatsiya/identifikatsiya po golosu v sistemakh upravleniya dostupom [Text-independent authentication / voice identification in access control systems], *X Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Problemy informatsionnoy bezopasnosti v sisteme vysshey shkoly»* [X all-Russian scientific and practical conference "Problems of information security in the system of higher education"]. Moscow: MIFI, 2003, pp. 28-29.
8. *Bimbot F. et al.* A Tutorial on Text-Independent Speaker Verification, *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2004, No. 4, pp. 430-451.
9. *Fant G.* Akusticheskaya teoriya recheobrazovaniya [Acoustic theory of speech formation]. Moscow: Nauka, 1964, 283 p.
10. *Dasgupta D.* Artificial Immune Systems and Their Applications, Ed., Springer-Verlag, 1999.
11. *De Castro L.N., Timmis, J.I.* Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach, London: Springer-Verlag, 2000, 357 p.
12. *Iskusstvennyye immunnnye sistemy i ikh primeneniye* [Artificial immune systems and their applications], ed.by D. Dasgupty: transl. from the engl. by A.A. Romanyukhi. Moscow: Fizmatlit, 2006, 344 p.
13. *Dasgupta D., Forrest S.* Tool breakage detection in milling operations using a negative-selection algorithm, *Technical report CS95-5, Department of computer science, University of New Mexico, 1995.*
14. *Forrest S., Perelson A.S., Allen L., Cherukuri R.* Self-nonsel self discrimination in a computer, *In: Proc. of IEEE symposium on research in security, Oakland, CA, 16-18 May 1994*, pp. 202-212.
15. *Opengeym A.V., Shafer R.V.* TSifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]: transl. from the engl., ed. by S.Ya. Shatsa. Moscow: Svyaz', 1979, 416 p.
16. *Rabiner L.R., Shafer R.V.* TSifrovaya obrabotka rechevykh signalov [Digital processing of speech signals]: transl. from the engl., ed. by M.V. Nazarova, Yu.N. Prokhorova. Moscow: Radio i svyaz', 1981, 495 p.
17. *Markel Dzh., Grey A.Kh.* Lineynoye predskazanie rechi [Linear prediction of speech]: transl. from the engl., ed. by Yu.N. Prokhorova, V.S. Zvezdina. Moscow: Svyaz', 1980, 308 p.
18. *Bryukhomitskiy Yu.A.* Immunologicheskii podkhod k organizatsii klaviaturnogo monitoringa [Immunological approach to the keyboard monitor], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 2 (151), pp. 33-41.
19. *Bryukhomitskiy Yu.A.* Immunologicheskii metod verifikatsii rukopisi s ispol'zovaniem vektornogo predstavleniya dannykh [Immunologicaki method of verification of the manuscript using vector data representation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 9 (182), pp. 50-57.
20. *Bryukhomitskiy Yu.A.* Immunologicheskii podkhod k identifikatsii lichnosti po dinamicheskim biometricheskim parametram [Immunological approach to the identification of the dynamic biometric parameters], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 5 (190), pp. 56-66.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Брюхомицкий Юрий Анатольевич – Южный федеральный университет; e-mail: bya@tgn.sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: +78634371905; кафедра безопасности информационных технологий; к.т.н.; с.н.с.; доцент.

Федоров Владимир Михайлович – e-mail: vladmih@rambler.ru; кафедра безопасности информационных технологий; к.ф.-м.н.; доцент.

Bryukhomitskiy Yuriy Anatoly – Southern Federal University; e-mail: bya@tgn.sfedu.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634371905; the department of information technology security; cand. of eng. sc.; senior researcher; associate professor.

Fedorov Vladimir Mikhailovich – e-mail: vladmih@rambler.ru; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.