

УДК 004.934.2

И.А. Гураков, Е.Ю. Костюченко, Д.И. Новохрестова, М.П. Силич

## Алгоритм выделения формант и поиска выровненных фрагментов при подготовке к проведению фоноскопической экспертизы

Одним из методов, используемых при проведении фоноскопических экспертиз, является метод формантного выравнивания. В его рамках сперва выделяются фрагменты, содержащие идентичную фонетическую информацию, в их рамках находятся участки с совпадающими частотами первой и второй формант (выровненные участки), которые используются в дальнейшем в рамках экспертизы. В рамках данной работы предложен и реализован алгоритм выделения формантных частот и поиска на их основе кандидатов на роль выровненных участков. Это позволяет сократить время проведения экспертизы за счет сокращения объема используемой для ручного анализа информации.

**Ключевые слова:** форманта, формантное выравнивание, фоноскопическая экспертиза.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-2-48-53

В криминалистике часто возникает потребность установления личности человека по имеющейся звукозаписи. С этой целью было разработано несколько методик идентификации лиц на основании физических параметров звучащей речи с применением ЭВМ [1–6]. Однако большинство этих методик требует наличия специализированного оборудования, позволяющего непосредственно обрабатывать звуковые сигналы [7]. При этом исследование звукозаписи перцептивными методами все равно является обязательным.

Известные в настоящее время методы использования результатов спектрального анализа речевых сигналов [8] можно классифицировать по типу выделяемых и сравниваемых признаков:

1) сравнение интегральных признаков усредненного спектра мощности, кросскорреляционного спектра, спектров более высокого порядка, среднего спектра отдельных фрагментов фонограмм для относительно длительного (около 10 с) суммарного звучания исследуемых голосов;

2) сравнение формантного спектра фонетически одинаковых звуков и звукосочетаний в сопоставимом контексте (ударные гласные, гласные равной степени редукции и т.д.). Иногда такой подход принято называть формантным микроанализом;

3) сравнение формантного спектра подобных артикуляторных событий:

– для мгновенных спектральных срезов;  
– для динамических структур формант внутри звука, слога, слова;

4) сравнение специфики спектрально-формантных структур, реализующих одинаковые артикуляторные динамические явления;

5) сравнение спектрально-гармонических характеристик ларингального тембра голоса для просодически подобных событий;

6) сравнение спектров и их динамики внутри периода основного тона голоса для сопоставимых фаз смыкания / размыкания голосовых складок для сопоставимых речевых фрагментов [9].

В [10] в качестве признаков использовались частота основного тона, три формантные частоты на переходных и стационарных участках гласных, параметры огибающей спектра фрикативных, а также общая длительность слова и относительные длительности сегментов речи. Явным недостатком этого подхода является то, что просодические характеристики обладают малой различающей способностью и легко поддаются имитации.

В [11] наиболее важным фактором индивидуальности голоса считается частота основного тона, за ней – формантные частоты, размер флюктуаций частоты основного тона и наклон спектра. Однако, как и в [10], несмотря на устойчивость этих признаков, они легко поддаются имитации и имеют малую различительную способность.

В [12] наиболее важным фактором считаются формантные частоты, в частности, четвертая форманта, которая практически не зависит от типа фонемы и характеризует тракт [13].

Имеющиеся работы позволяют говорить о наличии недостатков как в самих используемых подходах, так и в аспектах их автоматизации.

Цель данной работы – автоматизация выделения формантных частот и поиска на их основе кандидатов на роль выровненных участков. Это позволяет сократить время проведения экспертизы за счет сокращения объема используемой для ручного анализа информации. Ручной этап анализа полностью устранить не представляется возможным, поскольку в конечном итоге при проведении фоноскопической экспертизы принимает решение и несет за него соответствующую ответственность именно эксперт.

### Выделение формант

Типовая последовательность действий при выделении формант:

– просматривается спектрограмма и проводится поиск участков речевого спектра с ярко выраженной формантной картиной при наличии четвертой и более высоких формант. Обычно минимальной единицей рассмотрения является слог. На звукозаписи должен звучать голос только одного диктора [14];

– уяснение типичного поведения формант данного диктора для однотипных артикуляторных событий;

– выбор опорного фрагмента фонограммы, на котором прослеживается траектория четырех или более формант и выбранные спектральные максимумы однозначно интерпретируются как форманты, т.е. соответствуют теоретическому представлению, а все исчезновения формант или появление «лишних» формант можно разумно интерпретировать. Фрагмент выбирается с учетом типичного поведения формант данного диктора в данной артикуляторной ситуации;

– по выбранному фрагменту строится спектр и выбираются выраженные максимумы мощности в диапазонах, соответствующих стандартным диапазонам расположения формант.

Проблемы выделения формант:

1. Форманты постоянно меняют свое положение в процессе звучания слога. Если рассматривается не чистая гласная, а гласная в составе некоторого слога, то согласные, расположенные по обе стороны от нее, будут оказывать влияние на расположение формант, и с течением времени это влияние будет меняться. В результате, в одном слоге первые четыре форманты могут принимать теоретически бесконечное количество комбинаций. Можно выбирать только слоги, на спектрограммах которых можно выделить участок, на котором все форманты не изменяют свое положение, но такие случаи встречаются довольно редко, и нет никаких гарантий, что эти частоты действительно будут повторяться в других артикуляторно подобных ситуациях для того же диктора, поскольку положение формант зависит не только от характеристик речевого тракта и фонемы, но и от интонации [15] и психического состояния диктора, которые могут меняться в процессе разговора. Этот факт заметно снижает шанс корректной верификации диктора по коротким аудиозаписям (3–6 с) (рис. 1).

2. Появление «лишних» формант в одном или нескольких диапазонах спектра – очень частое явление. Стандартная методика предлагает не рассматривать такие случаи, однако факт того, что у конкретного диктора, в конкретной артикуляторной ситуации, в конкретной области спектра возникает «лишняя» форманта, также можно использовать при идентификации (рис. 2).

3. Проблему выбора диапазона также нельзя оставлять в стороне. Согласно методике, диапазон выбирается на основе типичного поведения формант для подобных артикуляторных событий, однако в обычной речи такие события не всегда встречаются часто, особенно для коротких аудиозаписей. В ударных слогах гласная может звучать до 120 мс, а диапазон, из которого выделяются форманты, обычно берут не более 30 мс. Следовательно, нужно определить правила выбора диапазона в случае, когда недостаточно подобных артикуляторных событий для выявления типичных закономерностей движения

формант, либо перейти от рассмотрения одного выровненного участка артикуляторного события исследуемой аудиозаписи к множеству участков одного артикуляторного события.

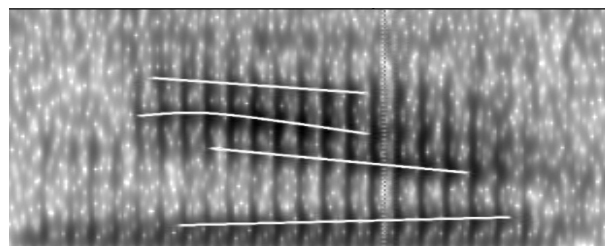


Рис. 1. Пример движения формант на примере спектрограммы слога «няк», зависимость частоты от времени

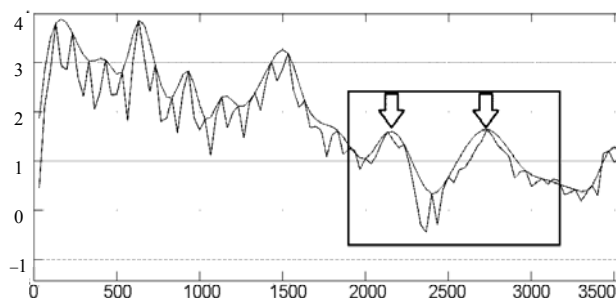


Рис. 2. Пример «лишней» форманты: ось абсцисс – частота, Гц, ординат – уровень

После анализа выделенных недостатков была сформулирована задача автоматизированного выделения формант.

Решение задачи автоматизированного выделения формант состоит в разработке метода и алгоритмов, использование которых позволит выделять список комбинаций первых четырех формант из звукозаписи с минимальным участием специалиста для контроля процесса.

Главные отличия новой методики от стандартной:

– в каждой исследуемой записи рассматривается не один 30 мс интервал, а множество таких интервалов с некоторым шагом внутри области звучания гласной. В результате каждому слогу будет соответствовать не один, а множество комбинаций формант;

– «лишние» форманты, которые в традиционной методике не рассматриваются, в новом методе были интерпретированы как два варианта одной форманты. Если такая форманта встречается в процессе анализа, то создается две комбинации формант как с одним вариантом, так и с другим. В результате на один интервал, в теории, может приходиться до 16 комбинаций формант.

#### Автоматизация выделения формант

Поиск формант состоит из двух этапов. В рамках первого проводится проверка предположения о наличии формант в анализируемом диапазоне частот. На втором этапе проводятся непосредственно измерения частот формант. Алгоритмы, позволяющие автоматизировать эти этапы, представлены на рис. 3 и 4.

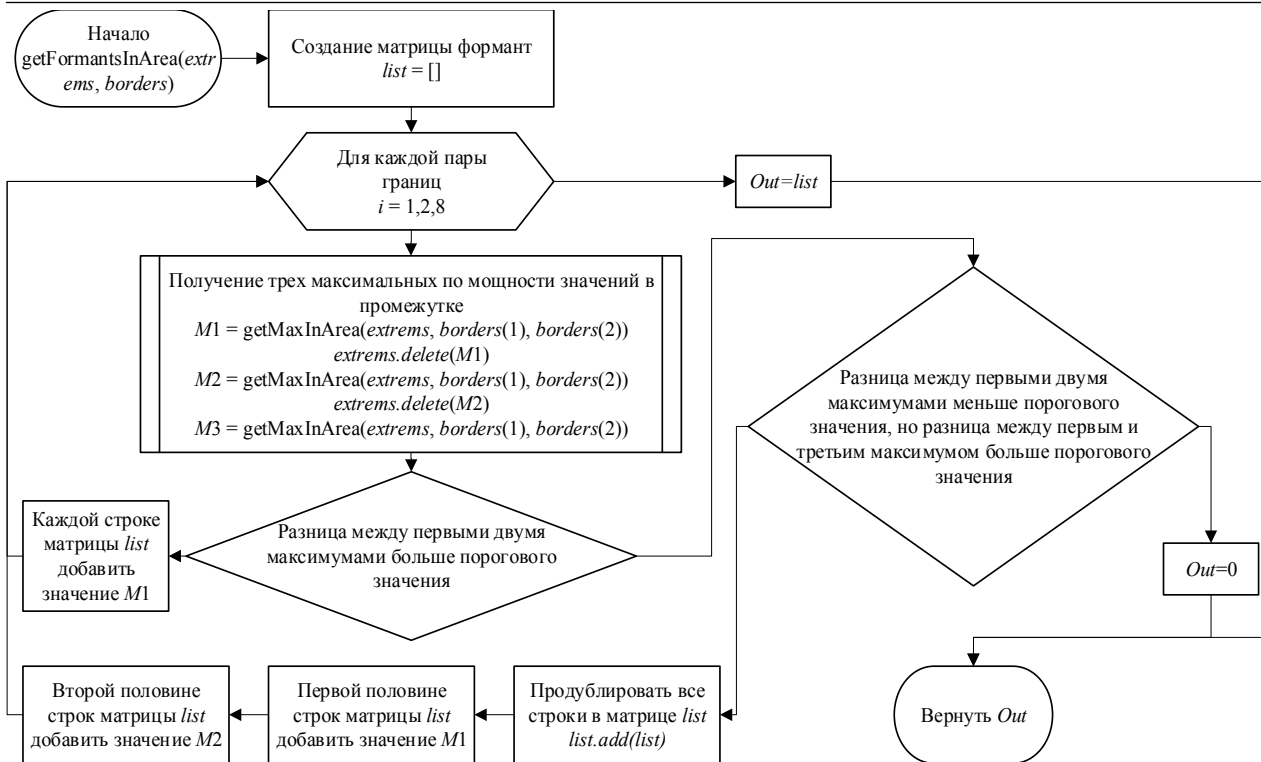


Рис. 3. Блок-схема алгоритма принятия решения о наличии или отсутствии формант в заданном диапазоне частот

### Поиск выровненных фрагментов

После этапа выделения формант проводится поиск выровненных участков, на которых частоты первой и второй формант совпадают. Реализованное программное обеспечение позволяет как непосредственно находить по измеренным ранее формантным частотам такие участки, так и фильтровать только те из них, на которых наблюдается совпадение третьей и четвертой формант. Наличие таких участков на идентичных с фонетической точки зрения фрагментах речевого сигнала является аргументом в пользу утверждения о совпадении дикторов на соответствующих анализируемых фрагментах. Точность совпадения формант является регулируемым параметром и задается пользователем. Программа написана на языке Matlab 2018a. В единственной таблице перечислены все найденные комбинации формант для каждого шага. В левой части формы указываются границы диапазонов частот, в которых программа будет искать каждую из формант. В программе можно осуществлять контроль корректности найденных формант. Для этого предусмотрены функции просмотра спектра, соответствующего конкретному набору формант, и просмотра положения промежутка длительностью 30 мс, которому соответствует этот спектр. Если, по мнению проверяющего, набор формант не подходит данному спектру, он может удалить соответствующую строку таблицы при помощи кнопки «Delete Row». После того как данные будут проверены, их можно экспортировать в файл с расширением «.xlsx», нажав кнопку «Export To Excel».

Разработан модуль, позволяющий сравнивать между собой списки формант двух выбранных

аудиозаписей и выводить список выровненных и совпавших участков.

В данном модуле для каждой аудиозаписи выбираются границы диапазонов частот, в которых будут искаяться форманты, выбираются файлы, которые будут сравниваться, и разбросы для каждой форманты, в пределах которых будет производиться заключение о совпадении или несовпадении формант. Этот разброс необходим по причине неустойчивого положения формант, в особенности третьей и четвертой, которые даже у одного и того же диктора в одинаковых слогах далеко не всегда принимают одинаковые значения. При выборе разброса нужно учитывать, что разница между формантами всегда будет кратна 33,3 Гц, это связано с тем, что берется промежутки длиной в 30 мс, а значит, независимо от частоты дискретизации, шаг частоты в спектре будет равен 33,3. Процесс сравнения аудиозаписей запустится после нажатия клавиши «Start».

Результатом работы данной программы являются два списка: список выровненных участков и список совпавших комбинаций формант. О степени схожести артикуляционных тракток дикторов можно судить по количеству выровненных и совпавших участков, а не по одному срезу, как предлагает традиционная методика.

### Анализ получаемых с помощью программы результатов

В ходе работы было сделано по 20 записей для 6 гласных в составе однотипного слога для 2 дикторов. Для каждого слога было составлено распределение, всего 240 распределений.

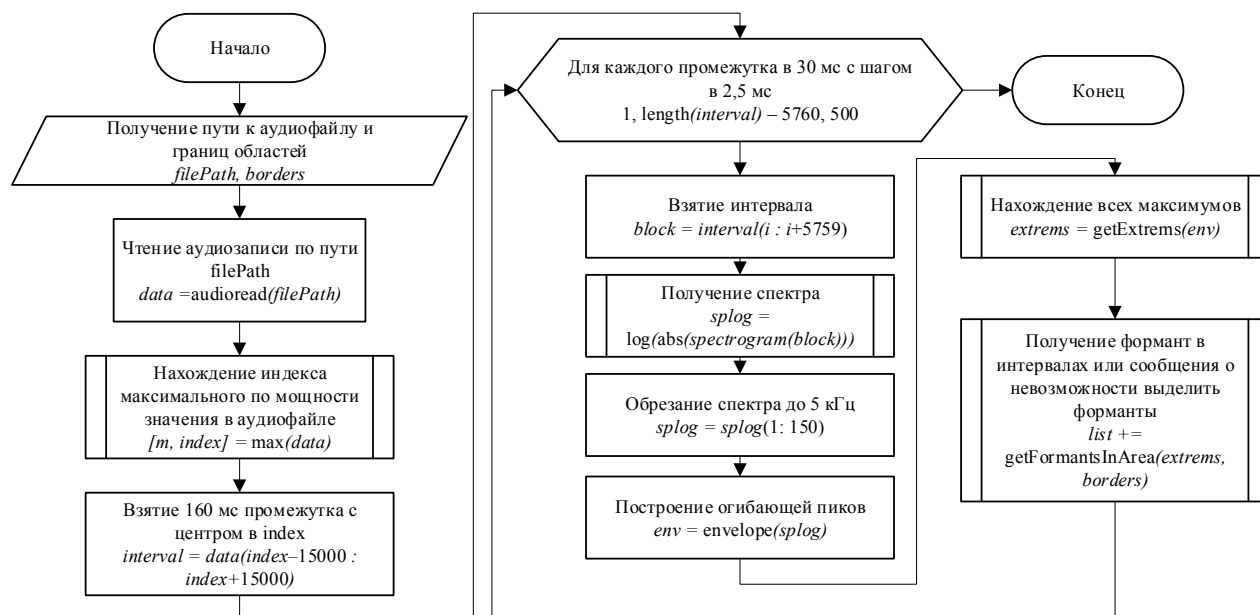


Рис. 4. Блок-схема алгоритма выделения формант

В дальнейшем они будут использоваться для обучения нейронной сети с целью еще большей автоматизации процесса. Небольшой размер базы объясняется предварительным тестированием программы, а не получением полноценного распределения формант. Были подсчитаны количества выровненных участков и совпавших формант для каждой из гласных. Пример результатов для звука «ы» (слог «нык») представлен в таблице.

Как видно из результатов сравнения, среднее количество выровненных участков и среднее количество совпавших комбинаций формант при сравнении записей в рамках одного диктора, как правило, многократно превышают эти параметры при сравнении разных дикторов. По количеству пар записей без выровненных участков и количеству пар записей без совпавших комбинаций формант также можно заметить, что при сравнении записей в рамках одного диктора эти значения заметно меньше, чем при сравнении разных дикторов.

Отдельное внимание стоит уделить парам записей, между которыми не было найдено совпадений. Стоит напомнить, что распределение, получаемое с каждой записи, обладает приличной избыточностью за счет «лишних» формант, а значит, что при корректно определенных диапазонах частот тот интервал, с которого традиционная методика предлагает выделять форманты, однозначно будет входить в эти распределения. Тот факт, что сравнение некоторых записей одного диктора показывает отсутствие совпавших пар формант, говорит о том, что традиционная методика также будет показывать отрицательный результат на этих парах записей.

Также стоит обратить внимание на огромную разницу между количеством выровненных участков и количеством совпавших пар формант. Традиционная методика утверждает, что высокие форманты полностью определяются нижними, но, учитывая

результаты эксперимента, становится очевидно, что одному набору первых двух формант одного диктора всегда соответствует множество вариантов третьей и четвертой формант. Возвращаясь к традиционной методике. После того как найден участок на исследуемой записи и осуществляется поиск выровненных участков, на одной записи может быть найдено множество выровненных участков, однако только 1–2 из них могут действительно соответствовать полному набору формант. Следовательно, у специалиста, который будет проводить анализ, есть высокий шанс ошибиться и сделать неверный вывод о схожести артикуляторных тракток дикторов в данных двух записях.

Результаты сравнения дикторов по слогу «нык»

	1-й и 1-й диктор	1-й и 2-й дикторы	2-й и 2-й диктор
Среднее количество выровненных участков	46,94737	4,0975	25,14211
Среднее количество совпавших комбинаций формант	4,068421	0,2875	4,710526
Максимальное количество выровненных участков	260	68	224
Максимальное количество совпавших участков	28	7	21
Количество пар записей без выровненных участков	14	228	36
Количество пар записей без совпавших комбинаций	148	381	126

### Заключение

В результате анализа источников и проведения ряда экспериментов была выявлена актуальность разработки автоматизированной системы выделения формант и, как продолжение этой системы, автома-

тизированной системы сравнения артикуляционных трактов дикторов на основе двух аудиозаписей. Были исследованы современные методы полуавтоматической верификации дикторов. В частности, был проанализирован метод формантного выравнивания, были выделены слабые места традиционной методики, которые учитывались при разработке нового алгоритма. Предложен новый метод верификации диктора на основе выровненных фрагментов, но с использованием множества опорных фрагментов из одной звукозаписи.

Был описан алгоритм новой методики и выполнена программная реализация на основе описанного алгоритма. Проведено первоначальное тестирование разработанных алгоритмов.

Были проанализированы полученные результаты. Сделан первичный вывод о работоспособности метода, а также подтверждены некоторые слабые места традиционной методики.

Получаемые значения частот формант могут быть использованы при проведении фоноскопической экспертизы. Кроме того, эти значения могут использоваться при изучении динамики характеристик речевого сигнала в процессе речевой реабилитации при оперативном лечении онкологических заболеваний органов речеобразующего тракта.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект «Восстановление речевой функции с использованием технических методов и математического моделирования у больных раком полости рта и ротоглотки после хирургического лечения», № 1615-00038.

### Литература

1. Рахманенко И.А. Программный комплекс для идентификации диктора по голосу с применением параллельных вычислений на центральном и графическом процессорах // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 70–74.
2. Rakhmanenko I. Text-independent speaker verification using convolutional deep belief network and gaussian mixture model / I. Rakhmanenko, R. Meshcheryakov // CEUR Workshop Proceedings. Secure Information Technologies 2017 (BIT 2017). – Moscow, Russia, 06–07 December 2017. – 2017. – PP. 118–121.
3. Qing Q. Speech authentication and content recovery scheme for security communication and storage / Q. Qing, W. Hongxia, S. Xingming et al. // Telecommunication Systems. – 2017. – Vol. 67, No. 4. – PP. 635–649.
4. Qiuyu Z. An efficient speech perceptual hashing authentication algorithm based on DWT and symmetric ternary string / Z. Qiuyu, X. Pengfei, H. Yibo, D. Ruihong, Y. Zhongping // International Journal of Information and Communication Technology. – 2017. – Vol. 12, No. 1-2. – PP. 31–50.
5. Felker N. Voice input for authentication / N. Felker, S. Chen, S. Mishra // Technical Disclosure Commons. Defensive Publications Series. – 2018. – Vol. 1128. – URL: [https://www.tdcommons.org/cgi/viewcontent.cgi?article=2191&context=dpubs\\_series](https://www.tdcommons.org/cgi/viewcontent.cgi?article=2191&context=dpubs_series) (дата обращения: 01.06.2018).
6. Hundal J.K. Some feature extraction techniques for voice based authentication system / J.K. Hundal, S.T. Hamde // 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPSCI). – 2017. – PP. 419–421. – URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ICPSCI.2017.8392328> (дата обращения: 01.06.2018).

7. Экспертиза видео- и звукозаписей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sudexpert.ru/possib/video.php> (дата обращения: 25.04.2018).

8. Wu C. Text-independent speech emotion recognition using frequency adaptive features / C. Wu, C. Huang, H. Chen // Multimedia Tools and Applications. – 2018. – PP. 1–11

9. Коваль С.Л. Сборник научно-методических рекомендаций по выполнению криминалистических экспертиз звукозаписей речи. – СПб.: Центр речевых технологий. – 2000. – 174 с.

10. Sorokin V.N. Speaker verification using the spectral and time parameters of voice signal / V.N. Sorokin, A.I. Tsyplikhin // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2010. – Vol. 10, No. 2. – PP. 87–104.

11. Multidimensional representation of personal quality of vowels and its acoustical correlates / H. Matsumoto, S. Hiki, T. Sone, T. Nimura // IEEE Trans. – 1973. – Vol. 21, No. 5. – PP. 428–436.

12. Lavner Y. The effects of acoustic modifications on the identification of familiar voices speaking isolated vowels / Y. Lavner, I. Gath, J. Rosenhouse // Speech Communication. – 2000. – Vol. 30, No. 1. – PP. 9–26.

13. Acoustic roles of the laryngeal cavity in vocal tract resonance / H. Takemoto, S. Adachi, T. Kitamura, P. Mokhtari, K. Honda // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2006. – Vol. 120, No. 4. – PP. 28–38.

14. Vainio L. The Influence of Number Magnitude on Vocal Responses / L. Vainio, T. Mustonen, M. Vainio // Journal of Motor Behavior. – 2018. – PP. 1–12.

15. Variability of articulator positions and formants across nine English vowels / D.H. Whalen, W. Chen, M.K. Tiede, H. Nam // Journal of Phonetics. – 2018. – Vol. 68. – PP. 1–14.

### Гураков Иван Алексеевич

Студент каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр., д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-34-26  
Эл. почта: [gia@fb.tusur.ru](mailto:gia@fb.tusur.ru)

### Костюченко Евгений Юрьевич

Канд. техн. наук, доцент каф. КИБЭВС ТУСУР  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-34-26  
Эл. почта: [key@keva.tusur.ru](mailto:key@keva.tusur.ru)

### Новохрестова Дарья Игоревна

Техник лаб. медико-биологических исследований (ЛМБИ) ТУСУР  
Ленина пр., д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29 (внутр. 29-66)  
Эл. почта: [ndi@fb.tusur.ru](mailto:ndi@fb.tusur.ru)

### Силич Мария Петровна

Профессор кафедры автоматизации обработки информации (АОИ) ТУСУР  
Ленина пр., д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-91 (внутр. 20-11)  
Эл. почта: [smp@muma.tusur.ru](mailto:smp@muma.tusur.ru)

Gurakov I.A., Kostyuchenko E.Y.,  
Novokhrestova D.I., Silich M.P.

**Algorithm for formants calculation and searching of aligned fragments in preparation for phonoscopic examination**

One of the methods used in conducting phonoscopic examinations is the method of formant alignment. Within this framework, fragments containing identical phonetic information are first identified, in their frames there are sections with coinciding frequencies of the first and second formants (aligned areas), which are used later in the phonoscopic examination. During this work, an algorithm for allocating the formant frequencies and searching on their basis candidates for the role of aligned areas has been proposed and implemented. This allows you to shorten the time of the phonoscopic examination due to the reduction of information used for manual analysis.

**Keywords:** formant, formant alignment, phonoscopic examination.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-2-48-53

*References*

1. Rakhmanenko I.A. Software system for speaker verification using parallel CPU and GPU computing. Proceedings of TUSUR University, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 70–74 (In Russ.).
2. Rakhmanenko I., Meshcheryakov R. Text-independent speaker verification using convolutional deep belief network and gaussian mixture model. *CEUR Workshop Proceedings. Secure Information Technologies 2017 (BIT 2017), Moscow, Russia, 06–07 December 2017*, pp. 118–121.
3. Qing Q., Hongxia W., Xingming S., Yunhe C., Huan W., Canghong S. Speech authentication and content recovery scheme for security communication and storage. *Telecommunication Systems*, 2017, vol. 67, no. 4, pp. 635–649.
4. Qiuyu Z., Pengfei X., Yibo H., Ruihong D., Zhongping Y. An efficient speech perceptual hashing authentication algorithm based on DWT and symmetric ternary string. *International Journal of Information and Communication Technology*, 2017, vol. 12, no. 1-2, pp. 31–50.
5. Felker N., Chen S., Mishra S. Voice input for authentication. *Technical Disclosure Commons. Defensive Publications Series*, 2018, vol. 1128. Available at: [https://www.tdcommons.org/cgi/viewcontent.cgi?article=2191&context=dpubs\\_series](https://www.tdcommons.org/cgi/viewcontent.cgi?article=2191&context=dpubs_series) (accessed: 1 June 2018).
6. Hundal J.K., Hamde S.T. Some feature extraction techniques for voice based authentication system. *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, 2017, pp. 419–421. Available at: <http://dx.doi.org/10.1109/ICPCSI.2017.8392328> (accessed: 1 June 2018).
7. *Ehkspertiza video- i zvukozapisej* [Examination of video and sound recordings] Available at: <http://www.sudexpert.ru/possib/video.php> (accessed: 25 April 2014).
8. Wu C. Text-independent speech emotion recognition using frequency adaptive features / C. Wu, C. Huang, H. Chen // *Multimedia Tools and Applications*, 2018, pp. 1–11.
9. Koval S.L. *Sbornik nauchno-metodicheskikh rekomendacij po vypolneniyu kriminalisticheskikh ehks-pertiz zvukozapisej rechi* [Collection of scientific and methodical recommendations on the performance of forensic examinations of sound recordings of speech]. Saint-Petersburg.: Center of speech technologies. 2000, 174 c. (in Russ.).
10. Sorokin V.N. Speaker verification using the spectral and time parameters of voice signal / V.N. Sorokin, A.I. Tsyplikhin // *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2010, vol. 10, no. 2, pp. 87–104.
11. Multidimensional representation of personal quality of vowels and its acoustical correlates / H. Matsumoto, S. Hiki, T. Sone, T. Nimura // *IEEE Trans.* 1973, vol. 21, no. 5, pp. 428–436.
12. Lavner Y. The effects of acoustic modifications on the identification of familiar voices speaking isolated vowels / Y. Lavner, I. Gath, J. Rosenhouse // *Speech Communication*. – 2000, vol. 30, no. 1, pp. 9–26.
13. Acoustic roles of the laryngeal cavity in vocal tract resonance / H. Takemoto, S. Adachi, T. Kitamura, P. Mokhtari, K. Honda // *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, vol. 120, no. 4, pp. 28–38.
14. Vainio L. The Influence of Number Magnitude on Vocal Responses / L. Vainio, T. Mustonen, M. Vainio // *Journal of Motor Behavior*, 2018, pp. 1–12.
15. Variability of articulator positions and formants across nine English vowels / D.H. Whalen, W. Chen, M.K. Tiede, H. Nam // *Journal of Phonetics*, 2018, vol. 68, pp. 1–14.

**Ivan A. Gurakov**

Student, Department of Complex Information Security, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 41-34-26  
Email: [gia@fb.tusur.ru](mailto:gia@fb.tusur.ru)

**Evgeny Y. Kostyuchenko**

Ph.D., associate professor,  
Department of Complex Information Security, TUSUR  
40, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0001-8000-2716  
Phone: +7 (382-2) 41-34-26  
Email: [key@keva.tusur.ru](mailto:key@keva.tusur.ru)

**Daria I. Novokhrestova**

Technician, Laboratory of Medic-Biological Researches, TUSUR  
40, Lenina prosp., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0002-4931-1681  
Phone: +7 (382-2) 70-15-29 (main 29-66)  
Email: [ndi@fb.tusur.ru](mailto:ndi@fb.tusur.ru)

**Maria P. Silich**

Department of Data Processing Automation, TUSUR  
40, Lenina prosp., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0002-4931-1681  
Phone: +7 (382-2) 70-15-29 (main 29-66)  
Email: [ndi@fb.tusur.ru](mailto:ndi@fb.tusur.ru)