

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 27

2021

№ 9

САПР

КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА

МЕТОДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

ОПЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДЫ

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

НЕЙРОСЕТИ И
НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ОПТИМИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

ИТ В ОБРАЗОВАНИИ

ГИС

«СРАВНЕНИЕ ТЕКСТОВ ПРОГРАММ С ОТКРЫТЫМ КОДОМ ПРИ ОБНОВЛЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАССТОЯНИЯ ДАМЕРАУ–ЛЕВЕНШТЕЙНА»

1	Если а > 10 Тогда	1	Сообщить (а) ;
2	с = а + 3;	2	Если а > 10 Тогда
3	н = с * 2;	3	с = а + 3;
4	к = н - 2;	4	н = с * 2;
5	КонецЕсли;	5	к = н - 2;
		6	КонецЕсли;

Рис. 1. Пример 1

1	Если а > 10 Тогда	1	Сообщить (а) ;
2	с = а + 3;	2	Если а >= 10 Тогда
3	н = с * 2;	3	с = а + 3;
4	к = н - 2;	4	н = с * 2;
5	КонецЕсли;	5	к = н - 2;
		6	КонецЕсли;

Рис. 2. Пример 2

1	Если а > 10 Тогда	1	Сообщить (а) ;
2	с = а + 3;	2	Если а >= 10 Тогда
3	н = с * 2;	3	с = а + 3;
4	к = н - 2;	4	н = с * 2;
5	КонецЕсли;	5	к = н - 2;
		6	КонецЕсли;

Рис. 3. Ожидаемый результат сравнения для примера 2

1	Если а > 10 Тогда	1	Если а > 11 Тогда
2	с = а + 3;	2	с = а + 3;
3	н = с * 2;	3	н = с * 2;
4	к = н - 2;	4	к = н - 2;
5	КонецЕсли;	5	КонецЕсли;

Рис. 4. Сравнение с новой версией

1	Если а > 10 Тогда	1	Если а > 11 Тогда	1	Сообщить (а) ;
2	с = а + 3;	2	с = а + 3;	2	Если а >= 10 Тогда
3	н = с * 2;	3	н = с * 2;	3	с = а + 3;
4	к = н - 2;	4	к = н - 2;	4	н = с * 2;
5	КонецЕсли;	5	КонецЕсли;	5	к = н - 2;
				6	КонецЕсли;

Рис. 5. Тройное сравнение (старая, пользовательская, новая)

1	Если а > 10 Тогда	1	Если а > 11 Тогда	1	Сообщить (а) ;
2	с = а + 3;	2	с = а + 3;	2	Если а >= 10 Тогда
3	н = с * 2;	3	н = с * 2;	3	с = а + 3;
4	к = н - 2;	4	к = н - 2;	4	н = с * 2;
5	КонецЕсли;	5	КонецЕсли;	5	к = н - 2;
				6	КонецЕсли;

Рис. 6. Новый способ тройного сравнения

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 27
2021
№ 9

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

DOI 10.17587/issn.1684-6400

УЧРЕДИТЕЛЬ

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Сапаров А. Ю., Бельтюков А. П., Маслов С. Г. Сравнение текстов программ с открытым кодом при обновлении с использованием расстояния Дамерау—Левенштейна 451

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Нарцев Д. Ю., Гнеушев А. Н. Сравнение модифицированных методов обучения Adam в задачах оценки параметров регрессионных моделей по изображению 461

БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОРМАЦИИ

- Хорев П. Б., Сергеев А. В. Анализ свойств и критерии обнаружения скрытых данных в документах Microsoft Word 470

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Афонин В. Л., Слепцов В. В. Нейронная сеть на основе специальной потенциальной функции для распознавания многофункциональных сигналов 478

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В БИОМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМАХ

- Щербань О. Г., Лазуренко Д. М., Щербань И. В., Кириленко Н. Е. Синтез адаптивного фильтра для автоматической детекции и локализации по оси времени премоторных ЭЭГ-паттернов мозга человека 484

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

- Вишнеков А. В., Ерохина Е. А., Иванова Е. М. Опыт применения цифровых технологий при переходе базового университетского образования на онлайн-формат обучения 494

Главный редактор:

СТЕМПОВСКИЙ А. Л.,
акад. РАН, д. т. н., проф.

Зам. главного редактора:

ИВАННИКОВ А. Д., д. т. н., проф.
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с.н.с.

Редакционный совет:

БЫЧКОВ И. В., акад. РАН, д. т. н.
ЖУРАВЛЕВ Ю. И.,
акад. РАН, д. ф.-м. н., проф.
КУЛЕШОВ А. П.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ПОПКОВ Ю. С.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
РУСАКОВ С. Г.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
РЯБОВ Г. Г.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
СОЙФЕР В. А.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
СОКОЛОВ И. А.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
СУЕТИН Н. В., д. ф.-м. н., проф.
ЧАПЛЫГИН Ю. А.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ШАХНОВ В. А.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
ШОКИН Ю. И.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ЮСУПОВ Р. М.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

Редакционная коллегия:

АВДОШИН С. М., к. т. н., доц.
АНТОНОВ Б. И.
БАРСКИЙ А. Б., д. т. н., проф.
ВАСЕНИН В. А., д. ф.-м. н., проф.
ВАСИЛЬЕВ В. И., д. т. н., проф.
ВИШНЕКОВ А. В., д. т. н., проф.
ДИМИТРИЕНКО Ю. И., д. ф.-м. н., проф.
ДОМРАЧЕВ В. Г., д. т. н., проф.
ЗАБОРОВСКИЙ В. С., д. т. н., проф.
ЗАРУБИН В. С., д. т. н., проф.
КАРПЕНКО А. П., д. ф.-м. н., проф.
КОЛИН К. К., д. т. н., проф.
КУЛАГИН В. П., д. т. н., проф.
КУРЕЙЧИК В. В., д. т. н., проф.
ЛЬВОВИЧ Я. Е., д. т. н., проф.
МАРТЫНОВ В. В., д. т. н., проф.
МИХАЙЛОВ Б. М., д. т. н., проф.
НЕЧАЕВ В. В., к. т. н., проф.
ПОЛЕШУК О. М., д. т. н., проф.
ПРОХОРОВ С. А., д. т. н., проф.
САКСОНОВ Е. А., д. т. н., проф.
СОКОЛОВ Б. В., д. т. н., проф.
СОЛОВЬЕВ Р. А., д. т. н., в. н. с.
ТИМОНИНА Е. Е., д. т. н., проф.
УСКОВ В. Л., к. т. н. (США)
ФОМИЧЕВ В. А., д. т. н., проф.
ШИЛОВ В. В., к. т. н., доц.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://novtex.ru/IT>.
Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования и базу данных RSCI на платформе Web of Science.
Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

INFORMATION TECHNOLOGIES INFORMACIONNYYE TEHNOLOGII

Vol. 27
2021
No. 9

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

DOI 10.17587/issn.1684-6400

ISSN 1684-6400

CONTENTS

SOFTWARE ENGINEERING. INTELLIGENT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

- Saparov A. Yu., Beltyukov A. P., Maslov S. G. Comparison of Open Source Code when Updating using the Damerau-Levenshtein Distance 451

DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

- Nartsev D. Yu., Gneushev A. N. Adam Optimization Method Modifications Comparison in the Regression Models Parameters Evaluation Tasks 461

INFORMATION SECURITY

- Khorev P. B., Sergeev A. V. Property Analysis and Criteria for Detecting Hidden Data in Microsoft Word Documents 470

NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES

- Afonin V. L., Sleptsov V. V. Neural Network Based on the Special Potential Function for the Recognition of the Multifunctional Signal 478

INFORMATION TECHNOLOGIES IN BIOMEDICAL SYSTEMS

- Shcherban O. G., Lazurenko D. M., Shcherban I. V., Kirilenko N. E. The Synthesis of an Adaptive Filter for Automatic Detection and Time Localization of Premotor EEG Patterns of the Human Brain 484

INFORMATION TECHNOLOGIES IN EDUCATION

- Vishnekov A. V., Erokhina E. A., Ivanova E. M. Digital Technology Implementation Practice during Conversion from Fundamental University Educational System into Online Format 494

Editor-in-Chief:

Stempkovsky A. L., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Deputy Editor-in-Chief:

Ivannikov A. D., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Filimonov N. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Chairman:

Bychkov I. V., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zhuravljov Yu. I., Member of RAS,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Kuleshov A. P., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Popkov Yu. S., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Rusakov S. G., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ryabov G. G., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Soifer V. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Sokolov I. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Suetin N. V.,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Chaplygin Yu. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shakhnov V. A., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shokin Yu. I., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Yusupov R. M., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial Board Members:

Avdoshin S. M., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.
Antonov B. I.
Barsky A. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Vasenin V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Vasiliev V. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Vishnekov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Dimitrienko Yu. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Domrachev V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zaborovsky V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zarubin V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Karpenko A. P., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Kolin K. K., Dr. Sci. (Tech.)
Kulagin V. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kureichik V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ljvovich Ya. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Martynov V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Mikhailov B. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Nechaev V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.
Poleschuk O. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Prokhorov S. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Saksonov E. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Sokolov B. V., Dr. Sci. (Tech.)
Solovyev R. A., Dr. Sci. (Tech.)
Timonina E. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Uskov V. L. (USA), Dr. Sci. (Tech.)
Fomichev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shilov V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.

Editors:

Bezmenova M. Yu.

Complete Internet version of the journal at site: <http://novtex.ru/IT>.

According to the decision of the Higher Certifying Commission of the Ministry of Education of Russian Federation, the journal is inscribed in "The List of the Leading Scientific Journals and Editions wherein Main Scientific Results of Theses for Doctor's or Candidate's Degrees Should Be Published"

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

SOFTWARE ENGINEERING. INTELLIGENT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

УДК 004.4'23, 004.5

DOI: 10.17587/it.27.451-460

А. Ю. Сапаров, канд. техн. наук, e-mail: say.saplh@gmail.com,
А. П. Бельтюков, д-р физ.-мат. наук, проф., e-mail: belt.udsu@mail.ru,
С. Г. Маслов, канд. техн. наук, доц., e-mail: msh.sci.it@gmail.com,
Удмуртский государственный университет, г. Ижевск

Сравнение текстов программ с открытым кодом при обновлении с использованием расстояния Дамерау—Левенштейна

Рассматривается проблема сравнения текстов, возникающая в процессе обновления программ с открытым кодом в случае наличия пользовательских изменений. Для правильного сопоставления строк двух текстов используется алгоритм, основанный на вычислении расстояния Дамерау—Левенштейна. Главное отличие предложенного алгоритма от классического заключается в том, что веса таких операций, как вставка, удаление, замена, перестановка, не являются константами, а зависят от значений отдельных элементов текста и их расположения. Также в работе описывается функционал, который позволяет упростить программисту задачу анализа изменений в текстах программ. Функционал основывается на динамическом управлении процессом сравнения, в ходе которого программист вручную может устанавливать соответствия между сравниваемыми текстами. Эффективность предложенного метода проверяется при обновлении модулей в системе ИС:Предприятие.

Ключевые слова: сравнение текстов, таблица преобразования, расстояние преобразования, вес операции преобразования, дважды измененные строки, функции динамического уточнения

Описание проблемы

При выходе новых версий программ в системах с открытым исходным кодом часто возникает проблема обновления. Это связано с тем, что пользователь уже подстроил под себя старую версию программы, внося в исходный код некоторые изменения. Если при этом выполнить обновление всех модулей (текстов программы) на модули из новой версии, то потеряются все изменения, внесенные пользователем. Если же оставить изменения пользователя, то он не получит новый функционал, который появился с выходом новой версии программы. В таких случаях полностью автоматическое обновление невозможно, и требуется ручная корректировка некоторых модулей. Для этого выполняется сравнение фрагментов текста программы, которые были изменены. Для наиболее быстрого и эффективного обновления требуется предоставлять результат сравнения в наиболее удобном для анализа виде: выделять измененные, удаленные, добавленные, перемещенные строки по отношению к старой версии.

Существует множество подходов к сравнению текстовых данных. Чаще всего они основаны на

поиске сходства в словах по тем или иным признакам. Например, в работе [1] поиск дублированных записей выполняется на основе семантико-синтаксической информации. Более полный анализ алгоритмов сравнения текстовых данных приводится в работах [2, 3], где дается их классификация. Рассматриваются алгоритмы сравнения текстов по строковому сходству (StringbasedSimilarity), сходству по содержанию (Corpus-basedSimilarity), сходству по знаниям (Knowledge-basedSimilarity), смешанному сходству (HybridSimilarities). В первом случае важно только единообразие во внешнем виде текстов. В остальных случаях для сравнения текстов выполняется поиск семантических связей на основе имеющихся данных и знаний. В задаче сравнения текстов программ важно учитывать семантическую составляющую. Но из-за большого разнообразия способов написания одних и тех же конструкций требуется накопление большого объема знаний. При этом накопленных знаний все равно может быть недостаточно, и результат сравнения получится неточным, если пользователь не имеет возможности выполнять корректировку. Большинство алгоритмов сравнения текстов в со-

временных работах [4–7], как правило, связаны с обработкой обычных строк. Тексты программ, с одной стороны, аналогичны обычным текстам, но, с другой стороны, составлены с учетом некоторых правил синтаксиса, и рассматриваемые алгоритмы в чистом виде не могут быть к ним применены. Если говорить о сложноструктурированных текстах [8, 9], то речь почти всегда идет о табличных данных, которые также во многом отличаются от кода программы.

Для сравнения текстов программ могут быть использованы различные алгоритмы и инструменты. Если рассматривать в чистом виде такие алгоритмы, которые основаны на вычислении минимального числа простейших операций преобразования для получения из старого текста нового (расстояние Левенштейна [10], сходство Джаро–Винклера [11], расстояние Хэмминга [12], расстояние Дамерау–Левенштейна [13], N-граммы [14]), то возникает проблема обработки больших текстов. Сложность таких алгоритмов равна (или близка) к $O(nm)$, где n — число символов в первом тексте, m — число символов во втором тексте. Если рассматривать тексты по 100 000 символов, для их обработки требуется порядка 10 млрд операций, что является довольно большой нагрузкой на вычислительные ресурсы. Если в качестве минимальных единиц в тексте рассматривать не отдельные символы, а целые строки, то в этом случае число требуемых операций заметно сокращается. Например, для тех же текстов по 100 000 символов это может быть порядка 25 млн операций, если считать, что в каждой строке в среднем по 20 символов (если считать, что одна строка — это одна отдельная конструкция языка программирования). Такое сравнение выполнится быстрее, но в этом случае возникает проблема с неточностями в итоговом результате.

Примеры

Рассмотрим примеры текстов программы.

Пример 1. Пусть есть два фрагмента кода программы:

1. Если $a > 10$ Тогда	2. Сообщить(a);
$c = a + 3;$	Если $a > 10$ Тогда
$n = c * 2;$	$c = a + 3;$
$k = n - 2;$	$n = c * 2;$
КонецЕсли;	$k = n - 2;$
	КонецЕсли;

Тексты отличаются тем, что во втором случае в начало добавлена строка "Сообщить(a)". Для таких текстов сравнение нам дает резуль-

тат, изображенный на рис. 1 (см. вторую сторону обложки).

Вывод по результату сравнения: во втором тексте добавлена строка на позиции 1, остальная часть текстов совпадает.

Пример 2. Изменим во втором тексте знак ">" на знак "> = ". Тогда фрагменты кода программы будут следующие:

1. Если $a > 10$ Тогда	2. Сообщить(a);
$c = a + 3;$	Если $a > = 10$ Тогда
$n = c * 2;$	$c = a + 3;$
$k = n - 2;$	$n = c * 2;$
КонецЕсли;	$k = n - 2;$
	КонецЕсли;

Результат сравнения изображен на рис. 2 (см. вторую сторону обложки).

Вывод по результату сравнения: во втором тексте изменена строка на позиции 1 с "Если $a > 10$ Тогда" на "Сообщить(a);", добавлена строка "Если $a > = 10$ Тогда" на позиции 2, остальная часть текстов совпадает. С учетом смысла и синтаксиса языка программирования ожидаемый результат сравнения изображен на рис. 3 (см. вторую сторону обложки).

Ожидаемый вывод по результату сравнения: во втором тексте на позиции 1 добавлена строка "Сообщить(a);", строка в позиции 2 изменена "Если $a > 10$ Тогда" на "Если $a > = 10$ Тогда", остальная часть текстов совпадает.

Задача обновления усложняется в том случае, если в новой версии программы внесены изменения в тех же строках, в которых внесены изменения пользователем. Будем называть такие строки *дважды измененными*. Пусть в новой версии код программы выглядит следующим образом:

```
Если  $a > 11$  Тогда
 $c = a + 3;$ 
 $n = c * 2;$ 
 $k = n - 2;$ 
КонецЕсли;
```

Результат сравнения изображен на рис. 4 (см. вторую сторону обложки), из которого следует, что изменена строка на позиции 1, остальная часть кода не изменялась.

Существуют средства автоматического объединения таких дважды измененных модулей, но они не могут гарантировать правильность объединения и, соответственно, корректность работы обновленной программы. Такие средства специализируются на техническом объединении текстов. В рассматриваемом примере при выполнении тройного сравнения будет получен результат, изображенный на рис. 5 (см. вторую сторону обложки).

Автоматическое принятие решения становится не однозначным, и эта неоднозначность заключается в проблеме объединения сразу двух строк. Для решения проблемы в случае неоднозначностей при объединении дважды измененных модулей привлекаются эксперты. Для наиболее быстрой проверки и эффективного исправления ошибок требуется представлять ему результат сравнения в максимально удобном виде.

Применение расстояния Дамерау—Левенштейна

Если рассматривать в чистом виде методы сравнения текстов, основанные на вычислении минимального числа простейших операций преобразований [13], то разработчики сталкиваются с некоторыми ограничениями. Первое ограничение связано с тем, что вес (сложность) каждой отдельно взятой операции является фиксированным значением. Например, не имеет разницы "а" заменить на "б" или "б" заменить на "в": число операций всегда равно единице, т. е. одной замене. Следующее ограничение связано с тем, что на вес не влияет положение символа в тексте. Например, если удалить первый символ или удалить последний символ, то сложность таких действий равна одной операции.

Для обхода данных ограничений дополним метод сравнения, основанный на вычислении расстояния Дамерау—Левенштейна [13]. В обычном виде расстояние между строками a и b (длины i и j соответственно) вычисляется по формуле:

$$d_{a,b}(i, j) = \begin{cases} \max(i, j), & \text{если } \min(i, j) = 0; \\ \min \begin{cases} d_{a,b}(i-1, j) + 1 \\ d_{a,b}(i, j-1) + 1 \\ d_{a,b}(i-1, j-1) + r_{(a_i \neq b_j)} \end{cases}, & \text{если } i, j > 1, a_i = b_{j-1}, a_{i-1} = b_j; \\ \min \begin{cases} d_{a,b}(i-1, j) + 1 \\ d_{a,b}(i, j-1) + 1 \\ d_{a,b}(i-1, j-1) + r_{(a_i \neq b_j)} \end{cases}, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (1)$$

где $r_{(a_i \neq b_j)} = \begin{cases} 0, & a_i = b_j \\ 1, & a_i \neq b_j \end{cases}$, каждый рекурсивный вызов функции d соответствует отдельному случаю:

- $d_{a,b}(i-1, j)$ — удаление символа из b ;
- $d_{a,b}(i, j-1)$ — добавление символа в b из a ;
- $d_{a,b}(i-1, j-1)$ — замена символа из b на символ из a ;
- $d_{a,b}(i-2, j-2)$ — перестановка двух соседних символов в b .

Дополним формулу (1) функцией f :

$$d_{a,b}(i, j) = \begin{cases} \max(i, j), & \text{если } \min(i, j) = 0; \\ \min \begin{cases} d_{a,b}(i-1, j) + f_{a,b}(i-1, j) \\ d_{a,b}(i, j-1) + f_{a,b}(i, j-1) \\ d_{a,b}(i-1, j-1) + f_{a,b}(i-1, j-1) \\ d_{a,b}(i-2, j-2) + f_{a,b}(i-2, j-2) \end{cases}, & \text{если } i, j > 1, a_i \approx b_{j-1}, a_{i-1} \approx b_j; \\ \min \begin{cases} d_{a,b}(i-1, j) + f_{a,b}(i-1, j) \\ d_{a,b}(i, j-1) + f_{a,b}(i, j-1) \\ d_{a,b}(i-1, j-1) + f_{a,b}(i-1, j-1) \end{cases}, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2)$$

где $f_{a,b}(i, j)$ — веса минимальных операций удаления, вставки, замены и перестановки. Пусть значения $f_{a,b}(i, j)$ не будут равняться единице, а будут зависеть от значений a_i и b_j и их расположения в тексте [15]. Пусть также a_i и b_j — не отдельные символы, а целые строки символов. Знак $\approx$ будет означать не полное равенство строк, а возможное их сходство по смыслу (либо по синтаксису):

$$(a \approx b) = \begin{cases} \text{Истина,} & t(a) = t(b), \\ \text{Ложь,} & \text{иначе,} \end{cases}$$

где

$$t(a) = \begin{cases} \text{"Если",} & a - \text{условный оператор;} \\ \text{"КонецЕсли",} & a - \text{конец условного оператора;} \\ \text{"ИмяПроцедуры"} & a = \text{"ИмяПроцедуры(Параметры)";} \\ \text{"Цикл"} & a - \text{оператор цикла;} \\ \text{"КонецЦикла"} & a - \text{оператор конца цикла;} \\ \dots & \end{cases}$$

Функция $t(a)$ возвращает фрагмент строки, определяющий ее основные характеристики. Например, для вызова процедуры с какими-либо параметрами это будет имя этой про-

цедуры. Вся функция не приводится в связи с большим объемом.

Рассмотрим несколько возможных вариантов для составления функции f :

1. Пусть $a_i = \text{"Сообщить(a); "}$, $b_j = \text{"Если } a \geq 10 \text{ Тогда"}$. Первая строка представлена вызовом процедуры, а вторая строка — условным оператором. Очевидно, что соответствие этих строк маловероятно. Тогда возьмем вес такой замены равным 2 ($f_{a,b}(i, j) = 2$).

2. Пусть $a_i = \text{"Если } a \geq 10 \text{ Тогда"}$, $b_j = \text{"Если } a > 10 \text{ Тогда"}$. Обе строки представлены условными операторами. Очевидно, что именно эти строки должны быть сопоставлены друг с другом при сравнении. Тогда возьмем вес такой замены равным 0,5 ($f_{a,b}(i, j) = 0,5$).

3. Пусть $a_i = \text{"Сообщить(a); "}$, $b_j = \text{"Сообщить(c); "}$. Возьмем вес такой замены равным 0,5 ($f_{a,b}(i, j) = 0,5$), так как строки близки по смыслу.

4. Пусть $a_i = \text{"Сообщить(a); "}$, $b_j = \text{"Сообщить(a); "}$ и пусть a_i расположено внутри условного оператора, а b_j расположено до условного оператора. Несмотря на равенство строк a_i и b_j возьмем вес такой замены равным 1 ($f_{a,b}(i, j) = 1$). Это уменьшит вероятность сопоставления отдельных строк, находящихся на разных уровнях иерархии.

5. Пусть a_i = любая строка (кроме "КонецЕсли;"), а $b_j = \text{"КонецЕсли;"}$. Возьмем вес такой замены равным 2 ($f_{a,b}(i, j) = 2$).

В общем виде функция $f_{a,b}(i, j)$ определяется следующим образом:

$$f_{a,b}(i, j) = \begin{cases} 0, & a_i = b_j, l(a_i) = l(b_j); \\ 0,5, & a_i \approx b_j, l(a_i) = l(b_j); \\ 1, & a_i = b_j, l(a_i) \neq l(b_j); \\ 2, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $l(a_i) = l(b_j)$ — истина, если a_i и b_j находятся на одном уровне иерархии, и ложь — в противном случае. Иными словами, если строки равны и находятся на одном уровне иерархии, то значение равно 0; если строки близки по смыслу (синтаксису), то значение равно 0,5; если строки равны, но находятся на разных уровнях иерархии, то значение равно 1; в остальных случаях значение равно 2.

Описание функции приведено в упрощенном виде. В зависимости от решаемой задачи она может быть расширена.

Вернемся к текстам из примера 2. Для простоты веса всех остальных операций будем считать равными единице.

1. Если $a > 10$ Тогда
 $c = a + 3$;
 $n = c * 2$;
 $k = n - 2$;
 КонецЕсли;

2. Сообщить(a);
 Если $a \geq 10$ Тогда
 $c = a + 3$;
 $n = c * 2$;
 $k = n - 2$;
 КонецЕсли;

Чтобы получить второй текст из первого, нам потребуется как минимум две операции. Изначальный вариант преобразования заключался в замене первой строки "Если $a > 10$ Тогда" на "Сообщить(a); " и добавлении "Если $a \geq 10$ Тогда". С учетом того, что вес замены "Сообщить(a); " на "Если $a \geq 10$ Тогда" равен 2, а вес добавления равен 1, то итоговый вес преобразования будет равняться 3.

Второй вариант преобразования заключается в добавлении строки "Сообщить(a); " и замене "Если $a > 10$ Тогда" на "Если $a \geq 10$ Тогда". Вес добавления "Сообщить(a); " равен 1, а вес замены "Если $a > 10$ Тогда" на "Если $a \geq 10$ Тогда" равен 0,5. Тогда итоговый вес преобразования будет равняться 1,5. При вычислении расстояния Дамерау—Левенштейна будет получено именно это значение и именно эта последовательность действий при преобразовании. Тогда итоговый вариант тройного сравнения изображен на рис. 6 (см. вторую сторону обложки).

В этом случае выражение "Сообщить(a); " однозначно располагается перед условным оператором. Неоднозначность заключается только в выборе правильного условия, что может быть решено, например, выбором условия из второго текста, если объединение выполняется с приоритетом новой версии, либо же выбором условия из третьего текста, если объединение выполняется с приоритетом изменений пользователя. Также объединение может быть выполнено по результатам экспертной оценки. Таким образом, работа самого эксперта может быть значительно упрощена.

Рассмотрим пошагово этапы вычисления расстояния. Для этого построим таблицу преобразования (табл. 1). В первой колонке таблицы укажем значения из первого текста, а в первой строке таблицы — значения из второго текста.

Вторая строка и второй столбец заполняются целыми числами от 0 до n , где n — длина соответствующего текста (эти значения будут соответствовать последовательному добавлению строк к пустому тексту, чтобы получить искомым текст).

Заполним пустые ячейки в третьей строке и в третьем столбце. Для вычисления значения в каждой новой ячейке используются значения в

Первый шаг вычисления расстояния

№	1	2	3	4	5	6	7	8
1			Сообщить(a);	Если a >= 10 Тогда	c = a + 3;	n = c*2;	к = n-2;	КонецЕсли;
2		0	1	2	3	4	5	6
3	Если a > 10 Тогда	1						
4	c = a + 3;	2						
5	n = c*2;	3						
6	к = n - 2;	4						
7	КонецЕсли;	5						

трех соседних (слева, сверху и в левом верхнем углу). В случае возможной перестановки строк используются значения сразу двух предыдущих по диагонали в левом верхнем углу.

Вычислим значение в ячейке (3, 3) (табл. 2). Так как a_i и b_j не равны, то согласно формуле (2)

$$d_{a,b}(1,1) = \min \begin{cases} 1 + f_{a,b}(0,1) \\ 1 + f_{a,b}(1,0) \\ 0 + f_{a,b}(0,0) \end{cases}$$

Так как a_i — условный оператор, а b_j — вызов процедуры, то вес такой замены согласно выше введенному правилу равняется 2. Веса добавления и удаления равны 1. Тогда

$$d_{a,b}(1,1) = \min\{1+1; 1+1; 0+2\} = 2.$$

Вычислим значение в ячейке (3, 4) (табл. 3). Так как строки не равны, но обе представлены условными операторами, то вес замены будет равняться 0,5. Веса добавления и удаления будут равняться 1.

Тогда согласно формуле (2) получаем

$$d_{a,b}(1,2) = \min\{1+1; 2+1; 1+0,5\} = 1,5.$$

Таблица 2

Вычисление значения в ячейке (3, 3) таблицы преобразования

№	1	2	3
1			Сообщить(a);
2		0	1
3	Если a > 10 Тогда	1	2

Таблица 3

Вычисление значения в ячейке (3, 4) таблицы преобразования

№	1	2	3	4
1			Сообщить(a);	Если a >= 10 Тогда
2		0	1	2
3	Если a > 10 Тогда	1	2	1,5

Аналогично заполняем остальные ячейки (табл. 4).

Как и предполагалось, итоговое расстояние преобразования равняется 1,5. По выделенным минимальным элементам таблицы можно восстановить последовательность действий преобразования текста.

Таблица 4

Таблица преобразования 1

№	1	2	3	4	5	6	7	8
1			Сообщить(a);	Если a >= 10 Тогда	c = a + 3;	n = c*2;	к = n-2;	КонецЕсли;
2		0	1	2	3	4	5	6
3	Если a > 10 Тогда	1	2	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5
4	c = a + 3;	2	2	2,5	1,5	2,5	3,5	4,5
5	n = c*2;	3	3	3	2,5	1,5	2,5	3,5
6	к = n - 2;	4	4	4	3,5	2,5	1,5	2,5
7	КонецЕсли;	5	5	5	4,5	3,5	2,5	1,5

Таблица преобразования 2

№	1	2	3	4	5	6	7	8
1			Если $a > 10$ Тогда	$c = a + 3$;	$n = c * 2$;	$k = n - 2$;	КонецЕсли;	Сообщить(a);
2		0	1	2	3	4	5	6
3	Если $a > 10$ Тогда	1	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5
4	$c = a + 3$;	2	1,5	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5
5	$n = c * 2$;	3	2,5	1,5	0,5	1,5	2,5	3,5
6	$k = n - 2$;	4	3,5	2,5	1,5	0,5	1,5	2,5
7	Сообщить(k);	5	4,5	3,5	2,5	1,5	2,5	2
8	КонецЕсли;	6	5,5	4,5	3,5	2,5	1,5	2,5

Рассмотрим еще один пример. Пусть есть следующие тексты для сравнения:

1. Если $a > 10$ Тогда
 $c = a + 3$;
 $n = c * 2$;
 $k = n - 2$;
Сообщить(k);
КонецЕсли;
2. Если $a \geq 10$ Тогда
 $c = a + 3$;
 $n = c * 2$;
 $k = n - 2$;
КонецЕсли;
Сообщить(a);

Заполним таблицу преобразования (табл. 5).

Поясним принцип вычисления некоторых ячеек. Вычислим значение в ячейке (7, 7) (табл. 6):

$$d_{a,b}(7,7) = \min\{1,5 + 1; 1,5 + 1; 1 + 2\} = 2,5.$$

Вес замены равен 2, так как требуется замена вызова процедуры на оператор конца условия.

Вычислим значение в ячейке (7, 8) (табл. 7):

$$d_{a,b}(7,8) = \min\{2,5 + 1; 2,5 + 1; 1,5 + 0,5\} = 2.$$

Вес замены равен 0,5, так как требуется замена близких по значению "Сообщить(k);" и "Сообщить(a);".

Вычислим значение в ячейке (8, 8) (табл. 8). Так как $a_{i-1} \approx b_j$ и $a_i = b_{j-1}$, то необходимо рассмотреть также возможность перестановки строк:

$$d_{a,b}(8,8) = \min\{1,5 + 1; 2 + 1; 2,5 + 2; 0,5 + 2\} = 2,5.$$

Вес перестановки равен 2, так как требуется перенести вызов процедуры из условия.

Итоговое заключение по результату сравнения: строка 1 заменена, строки 2, 3, 4 совпадают, строка 5 удалена, строка 6 первого текста совпадает со строкой 5 второго текста, добавлена строка 6 из второго текста. Графически результат сравнения изображен на рис. 7 (см. третью сторону обложки).

Таблица 6

Вычисление значения в ячейке (7, 7) таблицы преобразования

№		6	7
		$k = n - 2$;	КонецЕсли;
6	$k = n - 2$;	0,5	1,5
7	Сообщить(k);	1,5	2,5

Таблица 7

Вычисление значения в ячейке (7, 8) таблицы преобразования

№		7	8
		КонецЕсли;	Сообщить(a);
6	$k = n - 2$;	1,5	2,5
7	Сообщить(k);	2,5	2

Таблица 8

Вычисление значения в ячейке (8, 8) таблицы преобразования

№			7	8
		$k = n - 2$;	КонецЕсли;	Сообщить(a);
6	$k = n - 2$;	0,5	1,5	2,5
7	Сообщить(k);	1,5	2,5	2
8	КонецЕсли;	2,5	1,5	2,5

Для наглядности приведем еще таблицу преобразования (табл. 9) для текстов:

1. Если $a > 10$ Тогда
 $c = a + 3$;
 $n = c * 2$;
 $k = n - 2$;
Сообщить(k);
КонецЕсли;
2. Если $a \geq 10$ Тогда
 $c = a + 3$;
 $n = c * 2$;
Сообщить(a);
 $k = n - 2$;
КонецЕсли;

Таблица преобразования 3

№	1	2	3	4	5	6	7	8
1			Если $a \geq 10$ Тогда	$c = a + 3$;	$n = c * 2$;	Сообщить(a);	$k = n - 2$;	КонецЕсли;
2		0	1	2	3	4	5	6
3	Если $a > 10$ Тогда	1	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5
4	$c = a + 3$;	2	1,5	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5
5	$n = c * 2$;	3	2,5	1,5	0,5	1,5	2,5	3,5
6	$k = n - 2$;	4	3,5	2,5	1,5	1,5	1,5	2,5
7	Сообщить(k);	5	4,5	3,5	2,5	2	2	3
8	КонецЕсли;	6	5,5	4,5	3,5	3	3	2

Таблица 10

Вычисление значения в ячейке(7, 7) таблицы преобразования

№		5	6	7
		$n = c * 2$;	Сообщить(a);	$k = n - 2$;
5	$n = c * 2$;	0,5	1,5	2,5
6	$k = n - 2$;	1,5	1,5	1,5
7	Сообщить(k);	2,5	2	2

Опишем порядок вычисления значения в ячейке (7, 7) (табл. 10). Так $a_{i-1} = b_j$ и $a_i \approx b_{j-1}$, то необходимо рассмотреть также возможность перестановки строк:

$$d_{a,b}(7, 7) = \min\{2 + 1; 1,5 + 1; 1,5 + 1; 0,5 + 1,5\} = 2,5.$$

Вес перестановки равен 1,5, так как требуется переставляемые символы не полностью совпадают.

Согласно построенной табл. 9 последовательность операций выглядит следующим образом: строка 1 заменена, строки 2 и 3 совпадают, строки 4 и 5 переставлены местами и 5 строка заменена, строка 6 совпадает.

Управление процессом сравнения

Процесс сравнения основывается на построении таблицы преобразования и выборе пути от левого верхнего угла в правый нижний. Число таких возможных путей зависит от длин текстов, а сложность выбора зависит от числа отличий в текстах и их сложности. Несмотря на использование различных уточнений весов замен и перестановок, итоговый путь может оказаться неверным. Обычно при неверном выборе одного шага весь последующий выбранный путь становится некорректным. Для

решения проблемы предлагается использовать человеко-машинное взаимодействие.

Пусть a — первый текст; b — второй текст; d — таблица преобразования; $d(i, j)$ — значение в таблице преобразования; i, j — указывают на номера строк в текстах a и b соответственно; $w = ((0,0,1), (i_1, j_1, r_1), (i_2, j_2, r_2), \dots, (|a|, |b|, 1))$ — текущий выбранный путь в таблице преобразования. Путь задается в виде последовательности троек (i, j, r) , где i, j — номера строк в a и b соответственно, а r — метка ($r = 0$, если есть подозрения, что элемент выбран ошибочно, и $r = 1$, если выбор элемента правильный). По умолчанию все $r = 0$, $r = 1$ только после подтверждения пользователя. При $r = 0$ программе доступен выбор другого пути, при $r = 1$ путь должен обязательно проходить через этот элемент. Смысл этой метки в том, чтобы ограничить действия при автоматическом поиске пути и уменьшить вероятность неправильного выбора. Определим несколько функций:

- $\text{SELECT}(d, (i_1, j_1), (i_n, j_n)) := \text{return}((i_2, j_2, 0), \dots, (i_3, j_3, 0))$, где (i_1, j_1) — соседняя ячейка для (i_2, j_2) , а (i_n, j_n) — соседняя ячейка для (i_3, j_3) . Функция возвращает путь, составленный от (i_1, j_1) до (i_n, j_n) по принципу минимальных значений в таблице преобразования [13]. При этом значения меток указываются нулевые, а начало и конец пути в результат не включаются.
- $\text{CONFIRM}(w, n, m) := \forall t : n \leq t \leq m \ (w[t][3] = 1)$ — подтвердить, что путь w , начиная с шага n и заканчивая шагом m , выбран правильно. Функция устанавливает метку о правильности выбора текущих элементов в таблице перехода в значение 1. Требуется для того, чтобы при возможном пересчете повторно вычислялись значения только в тех ячейках, в которых есть сомнения.

- $\text{FIRST}(w, r, n, m) := \text{return } w[\min\{i | w[i][3] = r, n \leq i \leq m\}]$. Функция возвращает первый элемент в пути w с указанной меткой r среди элементов с номерами от n до m .
- $\text{LAST}(w, r, n, m) := \text{return } w[\max\{i | w[i][3] = r, n \leq i \leq m\}]$. Функция возвращает последний элемент в пути w с указанной меткой r среди элементов с номерами от n до m .
- $\text{REPLACE}(d, w, t, (i_n, j_m, r)) := w = (w[0], w[1], \dots, \text{LAST}(w, 1, 0, t - 1), \text{SELECT}(d, \text{LAST}(w, 1, 0, t - 1), (i_n, j_m, r)), (i_n, j_m, r), \text{SELECT}(d, (i_n, j_m, r), \text{FIRST}(w, 1, t + 1, |w|)), \text{FIRST}(w, 1, t + 1, |w|)), \dots, w[|w|])$. Функция удаляет в пути w элемент с номером t и добавляет вместо него новый элемент. При этом для итогового пути повторно выполняется поиск подпутей от предыдущего подтвержденного элемента до добавленного и от добавленного до следующего подтвержденного.
- $\text{ADD}(d, w, (i_n, j_m, r)) := w = (w[0], \text{SELECT}(d, w[0], (i_n, j_m, r)), (i_n, j_m, r), \text{SELECT}(d, (i_n, j_m, r), w[|w|]), w[|w|])$. Функция выполняет поиск пути, который проходит через указанный элемент.

Используя приведенные выше функции, пользователь может динамически управлять результатами сравнения. Если необходимо указать на соответствие двух строк разных текстов, то используется функция ADD либо REPLACE . Если при повторном пересчете путей не потерялись ранее правильно найденные соответствия, то используется функция CONFIRM . Благодаря такому человеко-машинному взаимодействию [16] пользователю максимально быстро и в максимально удобном виде предоставляется результат сравнения двух текстов. При этом упрощается требование к вычислительным ресурсам, так как выполняется не посимвольное сравнение текстов, а построчное, и при динамическом управлении процессом на каждом шаге выполняется не полное сравнение, а только сравнение фрагментов.

Заключение

При реализации алгоритмов сравнения текстов перед разработчиками встает вопрос выбора между производительностью и точностью. При посимвольном сравнении падает производительность, а при построчном теряется точность. В случае сравнения больших и сильно измененных текстов использование посимвольного метода становится неэффективным, если время ограничено. Если для этого использовать построчное сравнение, то результат сопоставления строк оказывается

очень неточным, особенно если есть перемешанные строки. Существуют и комбинированные алгоритмы, которые используют в паре посимвольное и построчное сравнение, либо сравнение фрагментами, но они не учитывают синтаксиса языка и не дают возможности вмешательства пользователя в этот процесс. В работе был описан метод сравнения, который позволяет решить данные проблемы.

Испытания предложенного метода сравнения текстов проводились на текстах модулей в системе "ИС:Предприятие" при переносе внесенных пользовательских изменений в код программы новой версии. Перенос изменений осуществляется опытным программистом, который анализирует изменения в текстах программы между старой версией и пользовательской версией и на основе анализа переносит их в текст новой версии. Задача анализа состоит в трех вещах: выяснить, какие и где в старой версии были внесены изменения; выяснить, какие и где в новой версии внесены изменения; совместимы ли внесенные пользовательские правки с новой версией. В зависимости от сложности и от объема отличий время анализа может занимать значительную часть рабочего времени программиста, которое он мог бы потратить на решение более интересных задач. Требуется максимально сократить время на эту довольно трудозатратную задачу. Для ускорения первых двух этапов анализа был использован предложенный метод.

Функция $f(i, j)$ была составлена с учетом синтаксиса языка программирования ИС и с учетом отдельных особенностей вносимых изменений, связанных в основном с принятыми корпоративными правилами по комментированию изменений, а также с учетом особенностей в кодах отдельно взятых конфигураций. По результатам испытаний можно сделать следующие выводы. Для модулей с небольшим числом изменений (менее 15 % строк) использование данного метода не требуется, так как встроенные программы сравнения дают достаточно точный результат, который позволяет программистам быстро анализировать все изменения. При анализе модулей с большими изменениями (15...50 % строк) требуется использование функций для динамического уточнения результата сравнения в среднем по 2...3 раза. При этом время, требуемое программисту для анализа изменений, сокращается в среднем на 20...25 %. Если модули изменены более чем на 50 %, то в некоторых случаях требуется тратить значительное время на использование функций динамического уточнения. Это связано с тем,

что совпадающих строк очень мало, из-за чего в таблице преобразования очень много путей с примерно равными весами, и поиск оптимального пути занимает много времени. Для решения проблемы требуется доработка метода, чтобы программа анализировала все предыдущие решения пользователя и предлагала варианты выбора на основе автоматического анализа кода и с учетом предыдущих действий.

Таким образом, можно сделать выводы, что на данном этапе использовать предложенный метод сравнения эффективно можно только на текстах с изменениями до 50 % строк. С учетом того, что большинство модулей с выходом новых версий не содержат такого большого числа изменений, то это может быть полезно для облегчения работы программистов. В дальнейшем планируется усовершенствовать метод, чтобы его можно было использовать при анализе изменений в текстах программ на других языках программирования и с принципиально другим синтаксисом.

Список литературы

1. Hadzic D., Sarajlic N. Methodology for fuzzy duplicate record identification based on the semantic syntactic information of similarity // Journal of King Saud University — Computer and Information Sciences. 2020. Vol. 32, Iss. 1. P. 126–136.
2. Prasetya D. D., PrasetyaWibawa A., Hirashima T. The performance of text similarity algorithms // International Journal of Advances in Intelligent Informatics. 2018. Vol. 4, N. 1. P. 63–69.
3. Goma W. H., Fahmy A. A. A survey of text similarity approaches // International Journal of Computer Applications. 2013. Vol. 68, N. 13. P. 13–18.
4. Бойцов Л. М. Классификация и экспериментальное исследование современных алгоритмов нечеткого словарного поиска // 6-я Всероссийская научная конференция "Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции". Пушкино, Россия, 2004.
5. Фролов А. С. Разработка алгоритма нечеткого поиска на основе хеширования // Молодой ученый. 2016. № 13 (117). С. 357–360.
6. Колесов Д. А. Разработка алгоритма поиска информации в базах данных с использованием функции нечеткого сравнения строк // Исследования по информатике. 2004. Вып. 7. С. 125–132.
7. Соченков И. В. Метод сравнения текстов для решения поисково-аналитических задач // Искусственный интеллект и принятие решений. 2013. № 2. С. 32–43.
8. Гринченков Д. В., Куций Д. Н. Решение задачи построения запросов в системе тематического поиска на основе распознавания частично структурированных текстов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки. 2019. № 1. С. 10–16.
9. Поволоцкий М. А., Тропин Д. В., Чернов Т. С., Савельев Б. И. Метод сегментации структурированных текстовых объектов на изображении с помощью динамического программирования // Информационные технологии и вычислительные системы. 2019. № 3. С. 66–78.
10. Левенштейн В. И. Двоичные коды с исправлением выпадений, вставок и замещений символов // Докл. АН СССР. 1965. Т. 163, № 4. С. 845–848.
11. Winkler W. E. String comparator metrics and enhanced decision rules in the Fellegi–Sunter model of Record Linkage // Reports — Evaluative/Feasibility (142). 1990. P. 8.
12. Hamming R. W. Error detecting and error correcting codes // The Bell System Technical Journal. 1950. Vol. 29, N. 2. P. 147–160.
13. Damerau F. J. A technique for computer detection and correction of spelling errors // Communications of the ACM. 1964. Vol. 7, N. 3. P. 171–176.
14. Kondrak G. N-gram similarity and distance // String Processing and Information Retrieval. 2005. P. 115–126.
15. Сапаров А. Ю., Бельтюков А. П., Маслов С. Г. Уточнение результатов распознавания математических формул с использованием расстояния Левенштейна // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2020. Т. 30, Вып. 3. С. 513–529.
16. Бельтюков А. П., Маслов С. Г. О понимании в рамках эргатической системы // Международное сотрудничество: интеграция образовательных пространств. Материалы III международной научно-практической конференции. УдГУ, Ижевск, 2016. С. 145–151.

A. Yu. Saparov, Cand. of Eng., e-mail: say.saplh@gmail.com,
A. P. Belyukov, Dr. of Ph.-Math. Sci., Professor, e-mail: belt.udsu@gmail.com,
S. G. Maslov, Cand. of Eng., Associate Professor, e-mail: msh.sci.it@gmail.com,
Udmurt State University, Izhevsk, 426034, Russian Federation

Comparison of Open Source Code when Updating using the Damerau-Levenshtein Distance

The paper describes a text comparison problem that arises during the update of open source programs in the presence of user changes. An algorithm based on calculating the Damerau — Levenshtein distance is used to correctly match the lines of two texts. The main difference between the proposed algorithm and the classical one is that the weights of such operations as insert, delete, replace, and permute are not constants, but depend on the values of individual text elements and their location. The paper also describes the functionality that allows the programmer to simplify the task of analyzing changes in program texts. The functionality is based on dynamic control of the comparison process, during which the programmer can manually establish correspondences between the compared texts. The effectiveness of the proposed method is checked when updating modules in the 1C:Enterprise system.

Keywords: text comparison, conversion table, conversion distance, weight of conversion operation, double modified strings, dynamic refinement functions

References

1. **Hadzic D., Sarajlic N.** Methodology for fuzzy duplicate record identification based on the semantic-syntactic information of similarity, *Journal of King Saud University — Computer and Information Science*, 2020, vol. 32, iss. 1, pp. 126—136.
2. **Prasetya D. D., Prasetya Wibawa A., Hirashima T.** The performance of text similarity algorithms, *International Journal of Advances in Intelligent Informatics*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 63—69.
3. **Gomaa W. H., Fahmy A. A.** A survey of text similarity approaches, *International Journal of Computer Applications*, 2013, vol. 68, no. 13, pp. 13—18.
4. **Boitsov L. M.** Classification and experimental study of the vocabulary of modern algorithms for fuzzy search, *6-ya Vserossiiskaya Nauchnaya Konferentsiya "Elektronnye Biblioteki: Perspektivnye Metody i Tekhnologii, Elektronnye Kollektzii" (6th all-Russian Scientific Conference "Electronic Libraries: Promising Methods and Technologies, Electronic Collections")*, Pushchino, Russia, 2004 (In Russian).
5. **Frolov A. S.** Development of fuzzy search algorithm based on hashing, *Molodoi Uchenyi*, 2016, no. 13 (117), pp. 357—360 (in Russian).
6. **Kolesov D. A.** Development of an algorithm for searching information in databases using the fuzzy string comparison function, *Issledovaniya po Informatike*, 2004, iss. 7, pp. 125—132 (in Russian).
7. **Sochenkov I. V.** Text comparison method for solving search and analytical problems, *Iskusstvennyi Intellekt i Prinyatie Reshenii*, 2013, no. 2, pp. 32—43 (in Russian).
8. **Grinchenkov D. V., Kushchii D. N.** Solution to problem of constructing inquiries in a thematic search based on recognition of partial structured texts, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Severo-Kavkazskii Region. Ser. Tekhnicheskie Nauki*, 2019, no. 1, pp. 10—16 (in Russian).
9. **Povolotskii M. A., Tropin D. V., Chernov T. S., Savelyev B. I.** A method of segmentation of structured text objects in an image using dynamic programming, *Informatsionnye Tekhnologii i Vychislitel'nye Sistemy*, 2019, no. 3, pp. 66—78 (in Russian).
10. **Levenshtein V. I.** Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals, *Sov. Phys., Dokl.*, 1965, vol. 10, pp. 707—710.
11. **Winkler W. E.** String comparator metrics and enhanced decision rules in the Fellegi-Sunter model of Record Linkage, *Reports — Evaluative/Feasibility (142)*, 1990, p. 8.
12. **Hamming R. W.** Error detecting and error correcting codes, *The Bell System Technical Journal*, 1950, vol. 29, no. 2, pp. 147—160.
13. **Damerau F. J.** A technique for computer detection and correction of spelling errors, *Communications of the ACM*, 1964, vol. 7, no. 3, pp. 171—176.
14. **Kondrak G.** N-gram similarity and distance, *String Processing and Information Retrieval*, 2005, pp. 115—126.
15. **Saparov A. Yu., Beltyukov A. P., Maslov S. G.** Refinement of the results of recognition of mathematical formulas using the Levenshtein distance, *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye Nauki*, 2020, vol. 30, iss. 3, pp. 513—529 (in Russian).
16. **Beltyukov A. P., Maslov S. G.** The understanding in the framework of the ergatic system, *III International Conference "International cooperation: integration of educational areas"*, Udmurt State University, Izhevsk, 2016, pp. 145—151 (in Russian).

Д. Ю. Нарцев, студент магистратуры, e-mail: dennartsev@gmail.com,
Московский физико-технический институт (НИУ),
А. Н. Гнеушев, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр., e-mail: gneushev@ccas.ru,
Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН

Сравнение модифицированных методов обучения Adam в задачах оценки параметров регрессионных моделей по изображению*

Представлено сравнение результатов обучения нейросетевых регрессионных моделей, обученных модификациями метода Adam, в задачах оценки степени размытости изображений глаз и оценки угла поворота лица на изображении для систем идентификации личности. Рассмотрены такие методы оптимизации, как SGDM, Adam, AdamW и RAdam. Для обеих задач была достигнута приемлемая для практического использования точность оценки целевых параметров моделями, обученными рассмотренными методами оптимизации. Модификации метода Adam (AdamW и RAdam) показали меньшее значение ошибки на тестовых базах, чем стандартный подход. Предложена модификация алгоритма RAdam, которая позволила уменьшить ошибку моделей более чем в полтора раза по сравнению с немодифицированной версией метода.

Ключевые слова: методы оптимизации, нейронные сети, задача регрессии, поворота лица, степень размытости изображения, качество изображения, SGD, SGDM, Adam, AdamW, RAdam

Введение

В настоящее время наиболее эффективным подходом для решения сложных и плохо формализуемых задач построения моделей в области интеллектуальных систем является использование нейросетевых моделей и машинного обучения. Такие модели используются в задачах автоматической локализации, сегментации и распознавания объектов на них, в коммерческих системах идентификации личности по изображениям лица, радужной оболочки глаза, кисти руки и т. д. Предварительная обработка изображения в подобных системах используется для устойчивого выделения признаков объекта, а также для фильтрации тех изображений, на которых уверенное распознавание объектов не может быть достигнуто с необходимой надежностью.

Важным этапом для задачи идентификации личности по изображению лица является предварительное выравнивание изображения. Для этого необходимо оценить положение лица на

нем. Решения этой задачи можно разделить на три типа: каскадная регрессия формы [1], статистические модели формы [2, 3] и прямые нейросетевые регрессионные модели [4, 5].

Показатели качества изображения определяются мерой его полезности для задачи распознавания объекта. В частности, для распознавания личности по радужной оболочке глаза фильтрация изображений глаз по качеству позволяет не только построить надежную обучающую базу изображений, но и уменьшить уровень ошибок идентификации при работе системы [6]. Подходы к оценке качества изображений можно разделить на абсолютные и относительные. Относительные показатели характеризуют выраженность признаков конкретного класса объектов [8] и могут использоваться только для относительного ранжирования изображений. Абсолютные показатели не зависят от структуры изображения объектов. Для их оценки используются нейросетевые регрессионные модели [7].

Обучение нейросетевых моделей является основным шагом для построения работающей системы. Задача обучения обычно формулируется с использованием оптимизации неко-

*Работа поддержана грантом РФФИ № 19-07-01231.

торого функционала качества, функционала уровня ошибки выходов нейросетевой регрессионной модели по ее параметрам или весам на обучающей выборке данных.

Для оптимизации функционала качества в основном применяются итеративные градиентные методы и их обобщения. Например, использование экспоненциальной фильтрации градиента вдоль итераций стохастического спуска в алгоритме SGDM [9] позволяет накапливать инерцию движения по рельефу функционала ошибки для преодоления локальных оптимумов. Дополнительно используется метод L_2 -регуляризации, минимизирующий норму весов модели, для избежания явления переобучения. Подход на основе оценки скользящего среднего значения градиента в процессе итераций используется для адаптации скорости обучения в методе ускоренных градиентов Нестерова [10].

В процессе обучения градиент функции ошибки по некоторым весам модели может стать существенно меньше, чем по остальным весам, таким образом, по части компонент оптимизация прекращается. В методе Adagrad [11] и его вариациях, таких как RMSprop [12] и Adadelta [13], предлагается увеличивать шаг итеративного спуска для тех весов, по которым средний градиент функции ошибки меньше, чем по остальным компонентам. Этот подход позволяет компенсировать неоднородность обучающей выборки.

В алгоритме Adam [14] для адаптации скорости сходимости предлагается дополнительно к экспоненциальному усреднению градиента нормировать шаг градиентного спуска с помощью средней оценки квадратов компонент градиента.

Сравнение метода SGDM и методов с адаптивным изменением шага, представленное в работе [15], в различных задачах машинного обучения показывает, что использование адаптивного шага уменьшает обобщающую способность обученной модели. Некоторые проблемы этих методов могут быть связаны с реализацией соответствующей процедуры адаптации шага. Например, в работе [16] исследуется модификация алгоритма Adam и обнаружено, что добавка к градиенту функции ошибки, связанная с L_2 -регуляризацией весов, влияет на результаты вычислений его средних характеристик. В своем методе AdamW [16] авторы предлагают фильтровать градиент без этой поправки и добавлять ее непосредственно к шагу итерации.

Сходимость методов, использующих различные моменты градиента функции ошибки, очень чувствительна к начальной инициализации

параметров и зависит от значений соответствующих моментов в начале обучения. Для начальной оценки моментов градиента используются различные подходы, например метод Warmup [17], в котором шаг градиентного спуска является, как правило, линейной возрастающей функцией от номера итерации. В методе RAdam [18] задается нелинейная зависимость нормировки шага градиентного спуска от номера итерации для получения устойчивых средних оценок градиента в начале обучения.

В настоящей работе рассматривается задача сравнения методов оптимизации SGDM, Adam и его различных модификаций для обучения нейросетевых моделей, решающих задачи регрессии для предварительной обработки изображения. В частности, рассматривается оценка угла поворота изображения лица для последующего выравнивания в задаче идентификации личности и оценка степени размытия изображения глаза для задачи идентификации по радужной оболочке.

Для решения поставленных задач предлагается рассматривать исходные изображения объектов как искаженные некоторым преобразованием с параметром, которое необходимо оценить. Рассматривается подход прямой оценки этих параметров непосредственно путем решения задачи регрессии по изображению с помощью обучения нейросетевых моделей. Для задачи оценки качества изображения глаза оцениваемым параметром является среднеквадратичное отклонение в гауссовской модели низкочастотной фильтрации, а для задачи оценки поворота лица оцениваемым параметром является угол поворота. Соответствующие регрессионные модели строятся путем обучения рассматриваемыми методами оптимизации на обучающих выборках, полученных моделированием соответствующих функций искажения. В качестве тестовых выборок, на которых для каждого метода определяется качество построенных моделей, используются изображения, полученные моделированием соответствующих искажений.

1. Постановка задачи

Обозначим множество эталонных изображений $\tilde{I} \subset R^{C \times H \times W}$, где C — число цветовых каналов; H , W — высота и ширина изображений соответственно. Модель искажения эталонных изображений определим как преобразование изображений, зависящее от параметра $y \in Y$:

$$M_y : \tilde{I} \rightarrow I, I \subset R^{C \times H \times W},$$

где Y — заданное множество возможных значений параметра. Сформируем обучающее множество искаженных изображений

$$S = \{I_i\}_{i=1}^N, I_i = M_{y_i}(\tilde{I}_i), \tilde{I}_i \in \tilde{I}, y_i \in Y,$$

где N — число изображений; $\{y_i\}_{i=1}^N$ — множество значений параметров преобразований изображений, формирующее разметку для обучающего множества S . Ставится задача построения нейросетевой модели $h(I|\theta)$, зависящей от весов θ для оценки параметров преобразования M_y путем решения задачи регрессии на обучающей выборке изображений S :

$$h(I_i|\theta) : I_i \rightarrow y_i, I_i \in S, i = 1, \dots, N.$$

Данная задача решается минимизацией функции ошибки предсказания модели на обучающих данных по весам θ . Выражение для общей функции ошибки $F(\theta)$ можно представить в виде

$$F(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L(h(I_i|\theta) - y_i), \quad (1)$$

где $L : R \rightarrow R$ — выпуклая функция с единственным глобальным минимумом в нуле. Тогда задача обучения регрессионной модели имеет вид

$$\min_{\theta} F(\theta). \quad (2)$$

Будем использовать функцию $L(x)$ средне-абсолютной ошибки:

$$L_{MAE}(x) = |x|. \quad (3)$$

В статье [19] показывается, что модели, обученные с применением функции WingLoss, достигали лучших результатов по сравнению с моделями, обученными с другими функциями ошибки в задачах оценки положений ключевых точек на лице. Форма функции WingLoss с параметрами p , ε и w определяется стратегией обучения, при которой больший вес имеют ошибки малого и среднего уровня:

$$L_{WingLoss}(x|w, \varepsilon, p) = \begin{cases} pw \ln(1 + |x|/\varepsilon), & |x| < w, \\ p(|x| - C(w, \varepsilon)), & |x| \geq w, \end{cases} \quad (4)$$

$$C(w, \varepsilon) = w - w \ln(1 + w/\varepsilon).$$

В работе ставится следующая задача: построить и обучить регрессионную нейросетевую модель $h(I|\theta)$ для двух различных функций M_y искажения изображения.

Для задачи оценки показателя размытия изображения глаза в роли искажающего преобразования M_y будем использовать модель гауссовского размытия [7], низкочастотную фильтрацию с ядром функции Гаусса с среднеквадратичным отклонением σ , где σ определяет параметр y :

$$I(m, n) = \frac{1}{2\pi\sigma} \sum_{u=-X}^X \sum_{v=-X}^X e^{-\frac{(u^2+v^2)}{2\sigma^2}} \tilde{I}(m+u, n+v), \quad (5)$$

где $X = [3\sigma]$ — целочисленное значение радиуса ядра гауссовского фильтра размером $(2X+1) \times (2X+1)$.

Для задачи оценки угла ориентации лица на изображении в качестве преобразования M_y будем использовать поворот на угол α с билинейной интерполяцией.

2. Модификации метода оптимизации Adam для обучения регрессионной модели

Будем считать, что функция ошибки $F(\theta)$ является дифференцируемой. Тогда для решения задачи минимизации (2) может быть использован итеративный метод градиентного спуска с экспоненциальным сглаживанием вдоль итераций с параметром $0 < \beta < 1$ (градиентный спуск с накоплением момента):

$$\mathbf{m}_t = \beta \mathbf{m}_{t-1} + (1 - \beta) \nabla F(\theta_{t-1}),$$

$$\theta_t = \theta_{t-1} - \lambda_t \mathbf{m}_t.$$

где θ_0 — начальная инициализация весов модели, определяется в начале процесса обучения; λ_t — шаг на t -й итерации алгоритма; $\nabla F(\theta)$ — градиент функции $F(\theta)$ по весам модели θ ; $\mathbf{m}_t$ — накопленный момент $\nabla F(\theta)$. Для параметра λ_t обычно задается ступенчатая убывающая функция от номера итерации t , которая определяется таблицей-расписанием обучения.

Данный метод позволяет преодолевать локальные минимумы для сложных функций ошибки большой размерности, так как даже при маленьком значении градиента на некотором шаге оптимизации значение накопленного момента остается значительным и позволяет продолжить процесс оптимизации.

Обученная модель $h(I|\theta)$ обладает обобщающей способностью, если ошибки ее предсказания на тестовых данных $I \notin S$ достаточно малы или незначительно превосходят ошибки на обучающих данных, иначе модель становится переобученной. Для того чтобы избежать переобучения, применяется метод регуляризации модели [20], который заключается в добавлении к функционалу ошибки L_2 -нормы весов:

$$F(\theta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i(\theta) + \frac{R}{2} \|\theta\|_2^2,$$

где $F_i(\theta) = L(h(I_i|\theta) - y_i)$; R — коэффициент регуляризации. В градиенте $\nabla F(\theta)$ возникает добавочный член $R\theta$, приводящий к уменьшению нормы весов.

Для нахождения точного градиента $\nabla F(\theta)$ требуется вычислить градиенты всех функций F_i . Если их число велико, то для оптимизации используется метод стохастического градиентного спуска (SGDM), в котором на каждом шаге итерации значение истинного градиента функции $\nabla F(\theta)$ приближается суммой $\nabla F(\theta)$ в точке θ для случайного подмножества тренировочных примеров I_i (мини-батча), разного на каждом шаге.

Несмотря на сглаживание градиента и накопление момента в методе SGDM часть компонент весов может стабилизироваться и перестать меняться в процессе оптимизации, так что по ним градиентный спуск остановится. В методе Adam [14] для решения этой проблемы предлагается оценивать разброс градиента вдоль траектории спуска и нормировать этим показателем шаг следующей итерации, так что чем более пологий рельеф оказался у функции ошибки, тем больший шаг будет выбран для следующей итерации. Используя в качестве такого показателя среднюю оценку квадратов компонент градиента, характеризующих вариацию кривизны рельефа функции ошибки, метод Adam можно представить в виде *Алгоритма 1*.

Алгоритм 1. Метод Adam [14], для векторных величин операции выполняются поэлементно.

1. $\mathbf{m}_0 = 0$, $\mathbf{v}_0 = 0$, $t = 0$, задаются параметры алгоритма: β_1 , β_2 , R .

Цикл. Повторять шаги 2—8 пока не выполнен критерий остановки.

2. $t = t + 1$.

3. $\mathbf{g}_t = \nabla F_t(\theta_{t-1}) + R\theta_{t-1}$.

4. $\mathbf{m}_t = \beta_1 \mathbf{m}_{t-1} + (1 - \beta_1) \mathbf{g}_t$.

5. $\mathbf{v}_t = \beta_2 \mathbf{v}_{t-1} + (1 - \beta_2) \mathbf{g}_t^2$.

6. $\mathbf{m}_t^* = \mathbf{m}_t / (1 - \beta_1^t)$.

7. $\mathbf{v}_t^* = \mathbf{v}_t / (1 - \beta_2^t)$.

8. $\theta_t = \theta_{t-1} - \lambda_t (\mathbf{m}_t^* / \sqrt{\mathbf{v}_t^*})$.

9. *Завершение алгоритма.*

На практике метод SGDM достигает лучших результатов, чем Adam, если для обучающей выборки правильно подобрано расписание уменьшения шага λ_t в процессе итераций [21]. Однако в работе [16] указывается, что неудовлетворительная адаптация шага в алгоритме Adam происходит за счет неправильной реализации оценки средних значений распределения градиента вдоль спуска, добавка к градиенту функции ошибки, связанная с L_2 -регуляризацией весов, искажает эту оценку. Предлагается модифицированный метод AdamW, в котором регуляризационная добавка перенесена в выражение для шага итерации, и шаг 3 Алгоритма 1 принимает вид

$$\mathbf{g}_t = \nabla F_t(\theta_{t-1}),$$

шаг 8 изменяется следующим образом:

$$\theta_t = \theta_{t-1} - \lambda_t (\mathbf{m}_t^* / \sqrt{\mathbf{v}_t^*} + R\theta_{t-1}). \quad (6)$$

В таких методах, как Adam и AdamW, использующих статистическую оценку градиентов вдоль траектории, существует проблема начальной инициализации средних оценок. Неадекватность их значений из-за недостаточной начальной статистики в начале обучения и, соответственно, некорректной нормировки шага итерации оказывает негативное влияние на процесс обучения. Обычным решением этой проблемы является использование подготовительного этапа обучения с помощью метода Warmup [17], на котором шаг итерации инициализируется небольшим значением, после чего в течение заданного числа итераций он возрастает в соответствии с заданной функцией. Таким образом, средние оценки градиента инициализируются в окрестности начальных значений весов модели.

Однако на практике результат работы метода Warmup существенно зависит от правильного выбора вида возрастающей функции шага и длительности подготовительного этапа. В методе RAdam [18] не используется подготовительный этап и водится масштабный коэффициент r_t для адаптивного шага, который имеет нелинейную зависимость от номера итерации t :

$$r_t = \sqrt{\frac{(\rho_t - 4)(\rho_t - 2)\rho_\infty}{(\rho_\infty - 4)(\rho_\infty - 2)\rho_t}},$$

где $\rho_\infty = 2/(1 - \beta_2) - 1$, $\rho_t = \rho_\infty - 2t\beta_2^t/(1 - \beta_2^t)$. Коэффициент r_t стабилизирует нормировку $1/\sqrt{\mathbf{v}_t}$ градиентного шага. При выполнении условий $0 < \beta_2 < 1$ и $\rho_t > 4$ параметр r_t является действительным числом, монотонно возрастает по t и стремится к единице в пределе $t \rightarrow \infty$ [18]. Таким образом, для модификации метода AdamW и получения алгоритма RAdam формула (6) принимает следующий вид:

$$\boldsymbol{\theta}_t = \begin{cases} \boldsymbol{\theta}_{t-1} - \lambda_t(\mathbf{m}_t^* r_t / \sqrt{\mathbf{v}_t^*} + R\boldsymbol{\theta}_{t-1}), \\ \text{при } \rho_t > 4; \\ \boldsymbol{\theta}_{t-1} - \lambda_t \mathbf{m}_t^*, \text{ иначе.} \end{cases} \quad (7)$$

Заметим, что в методе RAdam масштабный коэффициент r_t умножается только на нормированный средний градиент функции ошибки. Таким образом, в методе не учтено, что вес регуляризационной добавки оказывается более значительным, чем шаг по градиенту функции ошибки. Регуляризационная добавка становится определяющей масштаб всего шага итерации, который, таким образом, остается не стабилизированным в окрестности начально инициализированных весов. Этот факт затрудняет получение адекватной оценки начальных средних характеристик градиента и возвращает к проблеме метода AdamW. Более того, данная проблема приводит к занижению нормы весов и усилению ограничений на процесс оптимизации, что приводит к ухудшению сходимости всего метода. Для решения этой проблемы предлагается использовать коэффициент r_t для масштабирования всего шага итерации, т. е. дополнительно стабилизировать регуляризационную добавку. Тогда формула (7) принимает вид:

$$\boldsymbol{\theta}_t = \begin{cases} \boldsymbol{\theta}_{t-1} - \lambda_t r_t(\mathbf{m}_t^* / \sqrt{\mathbf{v}_t^*} + R\boldsymbol{\theta}_{t-1}), \\ \text{при } \rho_t > 4; \\ \boldsymbol{\theta}_{t-1} - \lambda_t \mathbf{m}_t^*, \text{ иначе.} \end{cases}$$

Для данной модификации будем использовать название RAdamW.

3. Вычислительные эксперименты

Одним из требований для систем распознавания является работа в режиме реального мас-

штаба времени. При этом подзадача предобработки изображения, являясь вспомогательной, должна потреблять минимум вычислительных ресурсов. Поэтому для решения поставленных задач была выбрана относительно простая для современных вычислительных платформ и широко используемая нейросетевая модель архитектуры ResNet [22] с предактивированным слоем (Full-pre-activation) [23] и 18 сверточными слоями — ResNet18. Обучение модели проводилось по сформированной обучающей выборке S путем решения задачи (2). Для методов оптимизации Adam, AdamW, RAdam и RAdamW были использованы параметры $\beta_1 = 0,9$, $\beta_2 = 0,99$, для метода SGD $\beta = 0,9$.

3.1 Модель оценки степени размытости изображения глаз

Выборки для обучения и тестирования модели были сформированы из открытых баз изображений глаз: BATH [24] и CASSIA [25] (рис. 1, см. третью сторону обложки). Для каждого изображения значение параметра ядра сглаживающего фильтра $\sigma \in [0, 6]$ для искажающего преобразования M , выбиралось случайным образом, оно определяло оцениваемый параметр модели $y = (\sigma - 3)/6$.

Размер обучающей выборки на основе базы BATH составлял 29749 изображений. Обучение длилось 130 эпох. Использовалось расписание уменьшения шага итерации с множителем 0,1 на 50 и на 100 эпохах.

Размер обучающей выборки на основе базы CASSIA составлял 5600 изображений. Обучение занимало 2500 эпох. Использовалось расписание уменьшения шага итерации с множителем 0,1 на 900 и на 1800 эпохах.

Для оптимизации (2) использовалась среднеабсолютная функция ошибки (3). Для метода Warmup с линейной функцией число подготовительных эпох обучения на базе BATH было равно двум, для базы CASSIA задавалось 10 эпох, шаг итерации менялся с 10^{-9} до 10^{-2} для метода SGD и до 10^{-4} для методов Adam и AdamW. Для оптимизации методами RAdam и RAdamW алгоритм Warmup не применялся, начальный шаг обучения был равен 10^{-3} . Коэффициент L_2 -регуляризации R для методов Adam и AdamW при обучении на базе BATH был равен 0,01, в остальных случаях задавался значением 0,1. Размер мини-батча был равен 128. Данные параметры показали наилучший результат в тестах.

Точность обученных регрессионных моделей для оценки степени размытия изображений глаз

Алгоритм	Обучающая база	CAO для BATH	CAO для CASSIA
SGD	BATH	0,034	0,052
Adam	BATH	0,039	0,068
AdamW	BATH	0,036	0,040
RAdam	BATH	0,028	0,034
RAdamW	BATH	0,015	0,022
SGD	CASSIA	0,018	0,022
Adam	CASSIA	0,039	0,036
AdamW	CASSIA	0,017	0,016
RAdam	CASSIA	0,013	0,016
RAdamW	CASSIA	0,012	0,014

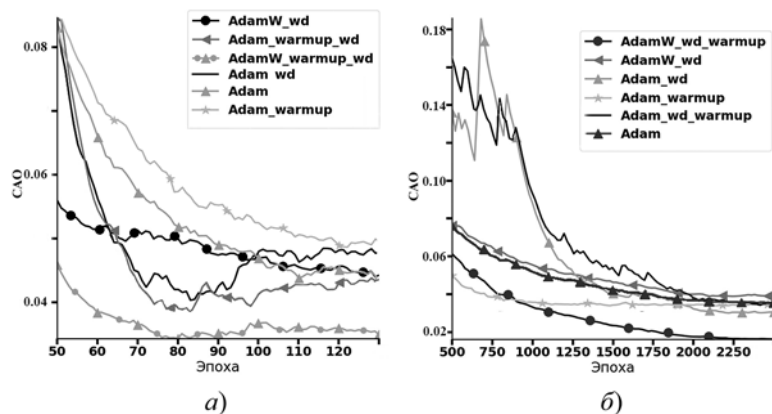


Рис. 2. Зависимость средней ошибки модели от номера эпохи при обучении методами Adam и AdamW:

а — точность на базе BATH; б — точность на базе CASSIA

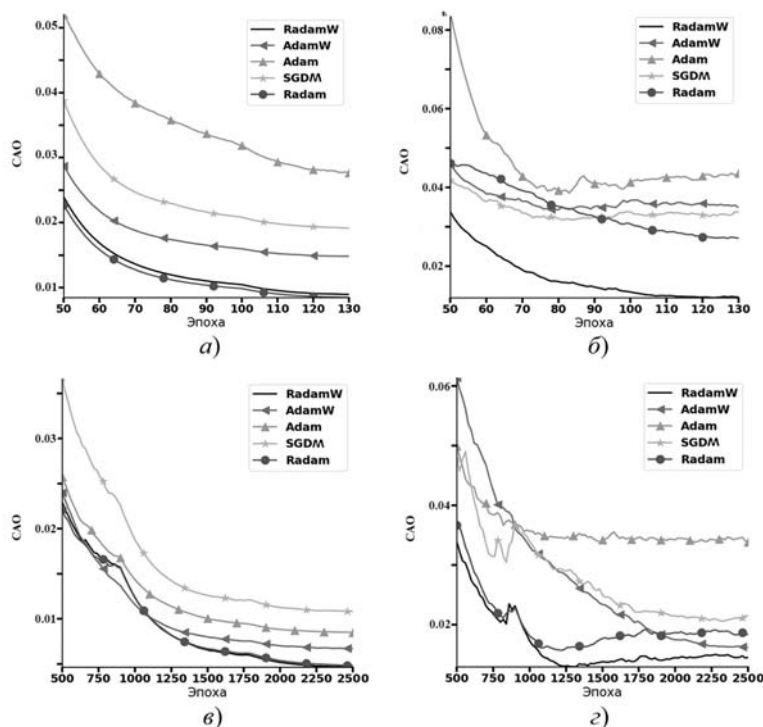


Рис. 3. Зависимость средней ошибки модели от номера эпохи при обучении рассматриваемыми методами:

а — для обучающей выборки BATH; б — для тестовой выборки BATH при обучении на BATH; в — для обучающей выборки CASSIA; г — для тестовой выборки CASSIA при обучении на CASSIA

Тестовая выборка на основе базы BATH содержала 2239 изображений. Тестовая выборка на основе базы CASSIA содержала 2100 изображений. Оценка точности обученных моделей проводилась для каждой эпохи обучения.

На рис. 2 показаны зависимости среднеабсолютной ошибки (CAO) модели от номера эпохи обучения методами Adam и AdamW на тестовых базах. Обозначение "wd" указывает на использование L_2 -регуляризации в методе, обозначение "Warmup" — на использование метода

Warmup. Из графиков видно, что при обучении на обеих базах методом AdamW использование алгоритма Warmup в дополнение к L_2 -регуляризации значительно уменьшает ошибку модели. Напротив, для метода Adam L_2 -регуляризация увеличивает ошибку модели на базе CASSIA. В дальнейших тестах для рассматриваемых методов использовались алгоритмы, показывающие лучшую точность.

Зависимости CAO от номера эпохи моделей, обученных методами SGDM, Adam, AdamW, RAdam и RAdamW, приведены на рис. 3. Обучение методом AdamW сходится быстрее, чем с использованием метода Adam и SGDM, при этом модель достигает вдвое меньшей ошибки на BATH и в 1,2 раза меньшей ошибки на CASSIA по сравнению с Adam на обучающей выборке.

Результаты тестов и точность соответствующих моделей представлены в табл. 1. На всех тестовых базах модель, обученная методом AdamW, имела сопоставимую или меньшую ошибку, чем модель, обученная с SGDM, и превосходила по точности модели, обученные Adam. Однако лучший результат был получен методами RAdam и RAdamW. Модель, обученная методом RAdamW, на тестовой базе BATH показала в 1,8 раз меньшую ошибку по сравнению с обучением RAdam и в 2,4 раза

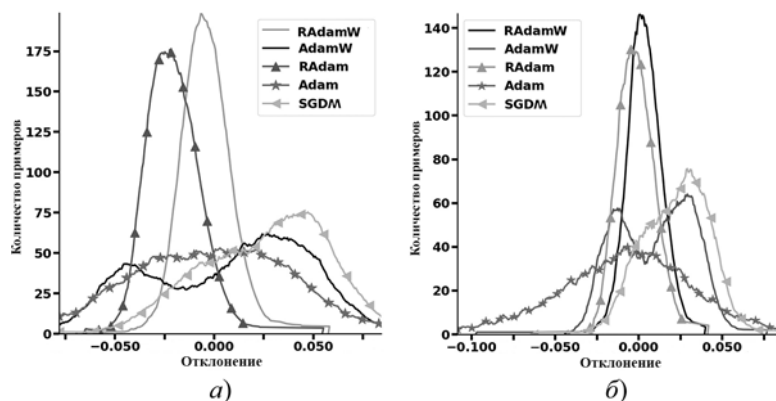


Рис. 4. Распределения числа примеров по отклонению предсказаний обученных моделей:

а — на тестовой выборке BATH при обучении на BATH; *б* — на тестовой выборке CASSIA при обучении на CASSIA

меньшую ошибку по сравнению с обучением AdamW.

На рис. 4 приведены распределения числа примеров по отклонению предсказаний обученных моделей. Модель, обученная методом RAdamW, имеет несмещенное и узкое распределение ошибки на всех тестовых выборках. Оценки моделей, обученных остальными методами, оказываются смещенными и с большей дисперсией.

3.2. Модель оценки угла поворота лица

Обучающая выборка состояла из 400 000 подготовленных изображений лиц из базы DeepGlint [26] (рис. 5, см. третью сторону обложки). Для каждого изображения значение угла поворота $\alpha \in [-\pi/4, \pi/4]$ для преобразования M_y выбиралось случайным образом. Оцениваемым параметром модели являлось нормированное значение $y = \frac{4\alpha}{\pi}$. Размер мини-батча для обучения равнялся 512, шаг ите-

рации был равен 0,01 с уменьшением в 10 раз на 100 и 200 эпохах. Для оптимизации (2) использовалась функция ошибки WingLoss (4) с параметрами $w = 0,03$, $\varepsilon = 0,03$, $p = 1$. Тестовая выборка содержала 35 000 изображений лиц.

Точность модели оценивалась по уровню среднеквадратичной ошибки (СКО) предсказания модели и истинных значений углов. В табл. 2 приведены значения СКО моделей, обученных различными методами оптимизации. Результаты показывают, что метод RAdamW позволяет обучить модель с наименьшей ошибкой по сравнению со всеми другими рассмотренными методами.

Заключение

Рассмотрены методы обучения регрессионной нейросетевой модели прямой оценки параметров для решения задач предварительной обработки изображения. Критерием качества метода оптимизации являлся уровень ошибок предсказания обученных моделей на тестовых выборках. Результаты экспериментов показали приемлемую для практических приложений точность оценивания целевых показателей и продемонстрировали преимущество методов RAdam и RAdamW среди алгоритмов SGDM, Adam и AdamW для всех рассмотренных задач. Предложенная модификация RAdamW позволила уменьшить среднюю ошибку обученной модели для оценки степени размытия изображений глаз более чем в 1,5 раза по сравнению с методом RAdam. Для задачи определения угла поворота лица на изображении метод RAdamW уменьшил ошибку предсказания обученной модели на 65 % по сравнению с методом RAdam, который оказался не точнее алгоритма AdamW. В целом модификации метода Adam позволяют обучить более точную нейросетевую регрессионную модель с меньшими усилиями по подбору параметров обучения, чем метод SGDM.

Таблица 2

Точность модели, обученной различными методами оптимизации, для задачи определения угла поворота лица на изображении

Алгоритм	<i>R</i>	СКО, °
Adam	0,1	2,13
Adam	0,0	2,10
AdamW	0,1	1,94
RAdam	0,1	1,92
RAdamW	0,1	1,16

Список литературы

1. Xiong X., De la Torre F. Supervised descent method and its applications to face alignment // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2013. P. 532–539.
2. Zhang Z., Luo P., Loy C. C., Tang X. Learning deep representation for face alignment with auxiliary attributes // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2016. Vol. 38, N. 5. P. 918–930.
3. Гнеушев А. Н. Построение и оптимизация текстурно-геометрической модели изображения лица в пространстве

базисных функций Габора // Известия Академии Наук. Теория и системы управления. 2007. № 3. С. 85–96.

4. Sun Y., Wang X., Tang X. Deep convolutional network cascade for facial point detection // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2013. P. 3476–3483.

5. Bulat A., Tzimiropoulos G. Binarized convolutional landmark localizers for human pose estimation and face alignment with limited resources // IEEE International Conference on Computer Vision. 2017. P. 3726–3734.

6. Гнеушев А. Н., Ковков Д. В., Матвеев И. А., Новик В. П. Оптимизация выбора биометрического эталона из последовательности // Известия Академии Наук. Теория и системы управления. 2015. № 3. С. 127–134.

7. Bosse S., Maniry D., Wiegand T. A deep neural network for image quality assessment // IEEE International Conference on Image Processing. 2016. P. 3773–3777.

8. Монич Ю. И., Старовойтов В. В. Оценки качества для анализа цифровых изображений // Искусственный интеллект. 2008. № 4. С. 376–386.

9. Поляк Б. Т. О некоторых способах ускорения сходимости итерационных методов // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1964. Т. 4, № 5. С. 1–17.

10. Нестеров Ю. Метод решения задачи выпуклого программирования со скоростью сходимости $O(1/k^2)$ // Доклады академии наук СССР. 1983. Т. 269, № 3. С. 543–547.

11. Duchi J., Hazan E., Singer Y. Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization // Journal of Machine Learning Research. 2010. Vol. 12. P. 2121–2159.

12. Hinton G., Srivastava N., Swersky K. Lecture 6e rmsprop: Divide the gradient by a running average of its recent magnitude [Электронный ресурс] // Computer science university of Toronto: cite. URL: http://www.cs.toronto.edu/~tijmen/csc321/slides/lecture_slides_lec6.pdf (дата обращения 16.11.2020)

13. Zeiler M. D. Adadelta: an adaptive learning rate method // Computing Research Repository. 2012. Vol. abs/1212.5701. P. 1–6.

14. Kingma D. P., Ba J. Adam: a method for stochastic optimization // 3rd International Conference on Learning Representations. 2015.

15. Wilson A. C., Roelofs R., Stern M., Srebro N., Recht B. The marginal value of adaptive gradient methods in machine learning // Advances in Neural Information Processing Systems 30. 2017. P. 4148–4158.

16. Loshchilov I., Hutter F. Decoupled weight decay regularization // 7th International Conference on Learning Representations. 2019.

17. Vaswani A., Shazeer N., Uszkoreit J. Attention is all you need // Advances in Neural Information Processing Systems 30. 2017. P. 5998–6008.

18. Liu L., Jiang H., He P. On the Variance of the Adaptive Learning Rate and Beyond // 8th International Conference on Learning Representations. 2020.

19. Feng Z., Kittler J., Awais M. Wing Loss for Robust Facial Landmark Localisation with Convolutional Neural Networks // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018. P. 2235–2245.

20. Girosi F., Jones M., Poggio T. Regularization Theory and Neural Networks Architectures // Neural Computation. 1995. Vol. 7, No. 2, P. 19–269

21. Krizhevsky A. Learning Multiple Layers of Features from Tiny Images // University of Toronto Technical Report. 2009. P. 1–58.

22. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016. P. 770–778.

23. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Identity Mappings in Deep Residual Networks // 14th European Conference on Computer Vision. 2016. P. 630–645.

24. Iris Image Database [Электронный ресурс]. // University of Bath: cite — URL: <http://www.bath.ac.uk/eleceng/research/sipg/irisweb/>. (дата обращения: 16.11.2020).

25. Iris Image Database, Version 3 [Электронный ресурс] // Chinese Academy of Sciences Institute of Automation: cite. URL: <http://www.cbsr.ia.ac.cn/IrisDatabase.htm>. (дата обращения: 16.11.2020).

26. Trillionpairs [Электронный ресурс] // DeepGlint: cite. URL: <http://trillionpairs.deeplint.com>. (дата обращения: 16.11.2020).

D. Yu. Nartsev, Master Student, e-mail: dennartsev@gmail.com,

Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141701, Moscow Region, Russian Federation,

A. N. Gneushev, Ph.D., Researcher, e-mail: gneushev@ccas.ru,

Federal Research Center "Computer Science and Control" of RAS, Moscow, 119333, Russian Federation

Adam Optimization Method Modifications Comparison in the Regression Models Parameters Evaluation Tasks

There is considered a problem of optimization methods comparing for the neural network regression task. Various optimization methods, such as stochastic gradient descent with momentum (SGDM), Adam and its modifications, AdamW and RAdam, were considered. To compare optimization method two regression task were formulated. Both tasks are connected with the preprocessing subtasks in the field of image analysis. The first considered task was the filtering blurred eye images on which confident recognition cannot be achieved. The training samples were generated by Gaussian blurring of the images. The blurring degree was estimated. The test and training sample for the assessment problem was formed on the basis of the BATH and CASSIA eye image databases. The second task was aligning faces in assessment image in face recognition systems. The training samples were generated by rotating face images, and rotation angle was estimated. To solve these tasks the direct estimation of parameters by solving the image regression problem by training neural network models is proposed. The adequate accuracy was acquired with all considered optimization methods for both tasks. Modifications of Adam algorithm show better results than original method. Both AdamW and RAdam methods reduced the error twice in comparison with Adam. The modification of the RAdam algorithm proposed in the work reduced the error by more than 1.5 times in comparison with the model trained by the original algorithm.

Keywords: optimization methods, neural networks, regression task, face rotation estimation, blur degree estimation, image quality assessment, SGD, Adam, AdamW, RAdam, machine learning

References

1. Xiong X., De la Torre F. Supervised descent method and its applications to face alignment, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2013, pp. 532–539.
2. Zhang Z., Luo P., Loy C. C., Tang X. Learning deep representation for face alignment with auxiliary attributes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2016, vol. 38, no. 5, pp. 918–930.
3. Gneushev A. N. Construction and Optimization of a Texture—Geometric Model of a Face Image in the Space of Basic Gabor Functions, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2007, vol. 46, no. 3, pp. 418–428.
4. Sun Y., Wang X., Tang X. Deep convolutional network cascade for facial point detection, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2013, pp. 3476–3483.
5. Bulat A., Tzimiropoulos G. Binarized convolutional landmark localizers for human pose estimation and face alignment with limited resources, *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2017, pp. 3726–3734.
6. Gneushev A. N., Kovkov D. V., Matveev I. A., Novik V. P. Optimizing the Selection of a Biometric Template from a Sequence, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2015, vol. 54, no. 3, pp. 399–405.
7. Bosse S., Maniry D., Wiegand T. A deep neural network for image quality assessment, *IEEE International Conference on Image Processing*, 2016, pp. 3773–3777.
8. Monich Yu., Starovoitov V. Image Quality Evaluation for Image Analysis, *Artificial Intelligence*, 2008, no. 4, pp. 376–386 (in Russian).
9. Polyak B. T. Some methods of speeding up the convergence of iteration methods, *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1964, vol. 4, no. 5, pp. 1–17 (in Russian).
10. Nesterov Yu. A method for unconstrained convex minimization problem with the rate of convergence $O(1/k^2)$, *Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 1983, vol. 269, no. 3, pp. 543–547 (in Russian).
11. Duchi J., Hazan E., Singer Y. Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization, *Journal of Machine Learning Research*, 2010, vol. 12, pp. 2121–2159.
12. Hinton G., Srivastava N., Swersky K. Lecture 6e rmsprop: Divide the gradient by a running average of its recent magnitude [Electronic resource], Computer science university of Toronto: cite, available at: http://www.cs.toronto.edu/~tijmen/csc321/slides/lecture_slides_lec6.pdf (date of request: 02.04.2012).
13. Zeiler M. D. Adadelta: an adaptive learning rate method, *Computing Research Repository*, 2012, vol. abs/1212.5701, pp. 1–6.
14. Kingma D. P., Ba J. Adam: a method for stochastic optimization, 3rd International Conference on Learning Representations, 2015.
15. Wilson A. C., Roelofs R., Stern M., Srebro N., Recht B. The marginal value of adaptive gradient methods in machine learning, *Advances in Neural Information Processing Systems* 30, 2017, pp. 4148–4158.
16. Loshchilov I., Hutter F. Decoupled weight decay regularization, *7th International Conference on Learning Representations*, 2019.
17. Vaswani A., Shazeer N., Uszkoreit J. Attention is all you need, *Advances in Neural Information Processing Systems* 30, 2017, pp. 5998–6008.
18. Liu L., Jiang H., He P. On the Variance of the Adaptive Learning Rate and Beyond, *8th International Conference on Learning Representations*, 2020.
19. Feng Z., Kittler J., Awais M. Wing Loss for Robust Facial Landmark Localisation with Convolutional Neural Networks, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, pp. 2235–2245.
20. Girosi F., Jones M., Poggio T. Regularization Theory and Neural Networks Architectures, *Neural Computation*, 1995, vol. 7, no. 2, pp. 19–269.
21. Krizhevsky A. Learning Multiple Layers of Features from Tiny Images, University of Toronto Technical Report, 2009, pp. 1–58.
22. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 770–778.
23. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Identity Mappings in Deep Residual Networks, *14th European Conference on Computer Vision*, 2016, pp. 630–645.
24. Iris Image Database [Electronic resource], University of Bath: cite, available at: <http://www.bath.ac.uk/eleceng/research/sipg/irisweb/>. (date of request: 2005).
25. Iris Image Database, Version 3 [Electronic resource], Chinese Academy of Sciences Institute of Automation: cite, available at: <http://www.cbsr.ia.ac.cn/IrisDatabase.htm>. (date of request: 2005).
26. Trillionpairs [Electronic resource], DeepGlint: cite, available at: <http://trillionpairs.deepglint.com>. (date of request: 2018).

П. Б. Хорев, канд. техн. наук, доц., проф., e-mail: pbkh@yandex.ru,
А. В. Сергеев, аспирант, доц., e-mail: profitdre@gmail.com,
Национальный исследовательский университет "МЭИ"

Анализ свойств и критерии обнаружения скрытых данных в документах Microsoft Word

Предлагаются критерии для обнаружения скрытых элементов в документах типа docx. С использованием особенности структуры формата данных проводится анализ наиболее выгодного стегоконтейнера. Представлена комплексная оценка тестируемых данных, на основании которых были предложены критерии по обнаружению скрытых элементов в документах Microsoft Word.

Ключевые слова: стеганография, скрытие данных, MS-Word, кодирование свойств

Введение

Обеспечение безопасности при обмене информацией с каждым годом становится все более важной задачей. В связи с этим обстоятельством актуальной становится задача обнаружения скрытых каналов передачи конфиденциальной информации с использованием методов стеганографии. Современная стеганография — это наука, которая изучает методы скрытого внедрения в различные типы данных (стегоконтейнеры) секретных сообщений, цифровых "водяных знаков" [1] или даже полностью конфиденциальных документов [2]. Как следствие, злоумышленниками совершенствуются методы и средства стеганографии в хищении ценных данных, в распространении вредоносного программного обеспечения [3—5].

Формат документов MS Word .docx в настоящее время является самым популярным для обмена данными, что позволяет применять такие документы в качестве контейнеров при сокрытии информации. Формат документа имеет множество возможностей, например, возможность строить электронные таблицы, графики, диаграммы, фигуры, добавлять графические материалы, электронные документы и скриптовые сценарии (макросы) на языке VBA (Visual Basic for Applications).

Такие особенности формата документов в MS Word позволяют использовать множество методов стеганографии. Однако следует отме-

тить, что в данной работе не рассматриваются базовые подходы к сокрытию информации путем изменения цветовой гаммы шрифта, использования внутреннего функционала "скрытый" и так далее. Целью работы является определение критериев для обнаружения стегоконтейнера формата .docx.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить несколько задач:

- 1) изучить формат документов типа .docx;
- 2) проанализировать и выявить наиболее подходящий стегоконтейнер с учетом различных характеристик и объема документа;
- 3) провести статистический и сравнительный анализ предлагаемого метода.

Структура документа .docx

Документы приложения Microsoft Word, входящего в программный пакет MS Office, по сути представляют собой ZIP-архив, состоящий из трех основных типов XML-элементов: content-type items, relationship items and common parts. Архив — бинарный файл, содержащий упорядоченную последовательность байтов. Также в архиве каждый файл имеет имя, атрибуты (например, время модификации файла) и другие свойства, которые отображаются менеджером файлов любой операционной системы. Формат документов типа .docx относится к формату

структуры OOXML [6]. С помощью любого приложения ZIP Manager [7, 8] можно просмотреть элементы .docx в архиве ZIP. Структурированные данные каждого элемента или части сначала кодируются в формате XML, а затем все элементы и части сжимаются в один ZIP-архив.

Одной из особенностей, связанных с форматом OOXML, является модульность файлов, что позволяет легко добавлять новые элементы или удалять старые. Например, в документ Word можно добавить новое изображение, выполнив для этого перечисленные ниже действия:

- 1) скопировав изображение в корень каталога с именем /media внутри ZIP-контейнера [9];
- 2) добавляя группы элементов в файл document.xml (файл содержит разметку XML, определяющую содержимое документа) для описания методов вставки на странице [10];
- 3) добавляя в несколько файлов отношений некоторых строк XML, объявляющих использование изображения [11].

Открытость такого формата позволяет исследовать документ на дополнительные вложения, не прибегая к излишнему разархивированию потоков данных. Используя богатые возможности MS Word, чтобы гарантировать более высокий уровень информационной безопасности Microsoft представила функцию под названием Document Inspector для быстрого поиска и удаления конфиденциальной информации.

Анализ свойств .docx

В ходе исследования формата .docx для выбора наиболее подходящего стегоконтейнера были проанализированы 15 различных документов с разными характеристиками, которые приведены в табл. 1. Основными отличительными характеристиками документов.docx были выбраны данные с различным содержанием текста и графических вставок, а также размера самого документа. Ис-

пользованный набор документов позволил дать относительно объективную оценку возможных вложений данных и определить оптимальные критерии их обнаружения.

Поиск лучшего контейнера для сокрытия данных на примере анализа 15 документов показал, что в основном самым объемным файлом является document.xml. Это обстоятельство делает его наиболее интересным для исследования методов стегоанализа таких контейнеров, поскольку незначительно измененный объем этого файла не должен вызывать подозрений. При анализе файла document.xml были собраны пять основных атрибутов для 15 документов .docx, которые представлены в табл. 2.

Атрибуты, представленные в табл. 2, имеют различные значения, а именно:

- атрибут rsidR определяет идентификатор, используемый для отслеживания сеанса редактирования, когда абзац был добавлен в основной документ;
- атрибут rsidRPr определяет идентификатор, используемый для отслеживания сеанса ре-

Таблица 1

Характеристики документов docx

Характеристики	Документы							
	1.docx	2.docx	3.docx	4.docx	5.docx	6.docx	7.docx	8.docx
Страницы	12	18	23	5	12	54	19	13
Слова	2110	6375	5202	1189	3693	10 785	6077	2402
Знаков	13 033	39 550	37 797	8330	28 367	76 991	45 111	13 033
Знаков с пробелами	15 128	45 726	42 843	9502	31 854	87 669	50 851	15 128
Медиа	9	0	10	0	0	5	3	0
Диаграммы	0	0	1	0	0	6	0	0
Вложения	0	0	1	0	3	0	2	0
Размер файла (Кбайт)	566	79	193	40	236	478	191	40
Характеристики	Документы							
	9.docx	10.docx	11.docx	12.docx	13.docx	14.docx	15.docx	
Страницы	12	8	8	17	10	5	7	
Слова	1825	802	1365	2736	1626	1043	1733	
Знаков	14 262	5 628	10 443	20 921	12 462	7808	13 882	
Знаков с пробелами	15 952	6 351	11 765	23 669	14 134	8805	15 548	
Медиа	0	1	0	1	2	0	0	
Диаграммы	0	0	0	4	5	0	0	
Вложения	0	0	0	0	0	0	0	
Размер файла (Кбайт)	33	60	31	202	178	20	24	

Таблица 2

Основные атрибуты document.xml

Атрибуты	Документы							
	1.docx	2.docx	3.docx	4.docx	5.docx	6.docx	7.docx	8.docx
rsidRPr	733	3103	860	325	1745	1694	2471	357
sz	605	3328	903	23	1502	1749	1525	667
szCs	583	3197	865	23	1333	1545	1526	669
spacing	185	822	457	14	275	362	79	162
rsidR	198	1319	607	317	1000	993	1663	340
Атрибуты	Документы							
	9.docx	10.docx	11.docx	12.docx	13.docx	14.docx	15.docx	
rsidRPr	423	334	314	525	327	142	195	
sz	465	49	299	595	672	65	193	
szCs	425	96	284	553	575	65	217	
spacing	154	68	89	110	50	58	75	
rsidR	177	339	167	316	360	67	92	

Таблица 3

Сортированные атрибуты

Атрибуты	Документы					
	1.docx	2.docx	3.docx	4.docx	5.docx	Сред. %
rsidRPr	24,67	16,34	15,31	29,95	20,43	21,34
sz	19,62	16,83	16,07	2,12	20,13	14,96
szCs	19,62	16,83	15,39	2,12	15,60	13,91
spacing	6,23	4,33	8,13	1,29	3,22	4,64
rsidR	5,49	6,94	10,80	29,22	11,26	12,74
% result	75,63	61,28	65,71	64,70	70,64	
Атрибуты	Документы					
	6.docx	7.docx	8.docx	9.docx	10.docx	Сред. %
rsidRPr	18,16	27,86	26,77	19,71	28,76	24,25
sz	18,10	9,64	18,20	9,49	11,96	13,48
szCs	16,56	16,19	9,53	10,37	10,75	12,48
spacing	7,44	3,72	8,76	7,13	4,53	6,32
rsidR	10,38	10,39	23,17	14,54	21,65	16,03
% result	70,64	67,80	86,43	61,24	77,65	
Атрибуты	Документы					
	11.docx	12.docx	13.docx	14.docx	15.docx	Сред. %
rsidRPr	19,95	22,62	23,84	17,61	26,19	22,04
sz	12,62	4,87	4,77	3,94	8,78	7,00
szCs	10,93	7,67	4,88	9,83	16,42	9,95
spacing	4,34	6,41	7,98	4,50	4,73	5,59
rsidR	12,79	9,56	22,37	14,63	21,17	16,10
% result	60,63	51,13	63,84	50,51	77,29	

дактирования, когда символ, представляющий знак абзаца, был в последний раз изменен в основном документе;

- атрибуты sz и szCs отвечают за размер шрифта и размер контура соответственно;
- атрибут spacing определяет пространство между символами, а также межстрочный интервал и интервал между абзацами.

В табл. 3 приведено число атрибутов в разных документах с исключением атрибутов с нулевыми значениями. В правом столбце этой таблицы приведено среднее значение числа атрибутов в проанализированных документах.

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показал, что атрибуты rsidRPr, rsidR, szCs и sz составляют более 60 % от общего объема используемых атрибутов с ненулевыми значениями. В связи с малой долей значений атрибута spacing от использования его для скрытия данных было решено отказаться.

При анализе было выявлено, что значения атрибутов sz и szCs имеют очень ограниченный диапазон значений, т. е. любое изменение значений атрибута sz или szCs будет легко обнаружено, поэтому от использования этих атрибутов для скрытия данных было также решено отказаться.

Все атрибуты rsid* указывают, что соответствующие области текста были изменены во время одного и того же сеанса редактирования (до следующей операции сохранения).

Автор документа может увеличить значения идентификатора сохранения редакции, чтобы указать последующие сеансы редактирования и порядок изменений относительно других изменений в этом документе. Анализ показал, что измененные значения этих атрибутов не нарушают целостность и работоспособность документа. Атрибут `spacing` также представляет интерес для возможного сокрытия данных, однако этот атрибут не всегда используется и имеет гораздо меньшее число значений, чем атрибут `rsid`. Нельзя исключить, что этот атрибут может больше подходить для стеганографического сокрытия данных, но в настоящей статье этот вариант не рассматривается.

Модели вложения данных

Для дальнейшего анализа предлагается рассмотреть несколько вариантов вложений данных в атрибуты, а именно — *A*, *B* и *C*. Следует выделить несколько перечисленных далее целей их вложения.

- 1. Увеличение емкости контейнера — позволяет вложить как можно больше данных, однако при этом повышается риск их обнаружения.
- 2. Увеличение сложности обнаружения — позволяет усложнить обнаружение стеганографического скрытия, однако при этом уменьшается емкость контейнера.

M					hex	bin				
MPEI					4D504549	1001101010100000100010101001001				
ORG	00	A7	4A	A9		ORG	00	A7	4A	A9
	↓	↓	↓	↓				↓	↓	↓
M	4D	50	45	49		M	4D	50	45	49
	↓	↓	↓	↓				↓	↓	↓
MOD	4D	50	45	49		MOD	00	A7	45	49

Рис. 1. Полная и частичная замена данных

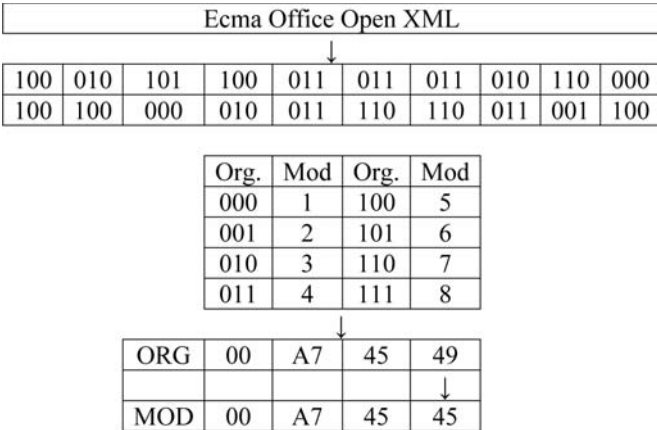


Рис. 2. Замена младшего байта

Учитывая обозначенные выше цели, предлагается рассмотреть три алгоритма внедрения данных:

- A. Полная замена данных.
- B. Частичная замена данных.
- C. Замена наименее значимого бита (LSB).

На рис. 1 показаны результаты использования двух вариантов внедрения данных, где *M* — секретное сообщение. Для третьего варианта с использованием алгоритма [12] применяется метод замены наименьшего значащего байта (LSB). Замена происходит по принципу перевода секретного сообщения в двоичное представление из трех битов, которое затем преобразуется в десятичную систему счисления, как показано на рис. 1. После этого проводится замена последнего байта оригинального сообщения на байт секретного сообщения (рис. 2).

Для сокрытия данных были выбраны атрибуты `rsidRPr` и `rsidR`, так как число этих атрибутов достаточно велико, и они всегда присутствуют в документах. При таком редактировании значения практически не изменяется объем документа и не нарушается работоспособность Microsoft Word.

Одним из возможных способов обнаружения можно считать сравнение уникальных значений `rsidRPr` и числа редакций документа. Разработанный Microsoft функционал Document Inspector [13] позволяет удалять информацию о числе редакций, авторах и так далее. Рассматривается ситуация, в которой аналитику необходимо изучить документ без метаданных на предмет стеганографического использования его атрибутов.

Статистический анализ

Вначале необходимо рассчитать энтропию данных по следующей формуле:

H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \tag{1}

где p_i — вероятность события i .
В табл. 4 представлены результаты вычислений по формуле 1 к значениям атрибута `rsid*` в 15 документах формата `.docx`, а также к значениям атрибута `rsid*` после вложения данных по алгоритмам *A*, *B* и *C*.
Анализируя представленные результаты, можно заметить, что при использовании алгоритма *A* получаем энтропию, отличную от документа с оригинальными значениями атри-

Таблица 4

Результаты энтропии данных

Тип данных	Метод	Документы				
		1.docx	2.docx	3.docx	4.docx	5.docx
Org	rsdiR*	3,1411	2,5607	3,3209	2,9943	3,1043
Mod	A	3,9592	3,9239	3,9532	3,9239	3,9592
Mod	B	3,4229	3,4355	3,5592	3,6285	3,8532
Mod	C	3,3626	2,8850	3,3665	3,1185	3,6149
Тип данных	Метод	Документы				
		6.docx	7.docx	8.docx	9.docx	10.docx
Org	rsdiR*	2,3469	2,7500	3,4589	2,6365	3,0427
Mod	A	3,9592	3,9608	3,9592	3,9592	3,9592
Mod	B	3,3421	3,6413	3,6413	3,3997	3,5459
Mod	C	3,1685	3,5815	3,5815	3,1613	3,5324
Тип данных	Метод	Документы				
		11.docx	12.docx	13.docx	14.docx	15.docx
Org	rsdiR*	3,0550	3,0515	3,4997	3,1198	3,0904
Mod	A	3,9592	3,9592	3,9592	3,9592	3,9532
Mod	B	3,5927	3,5185	3,6454	3,6081	3,4564
Mod	C	3,4234	3,4524	3,5823	3,5468	3,1389

бута rsdiR*. Применение алгоритма C, как и предполагалось, не сказывается существенно на оригинальных значениях атрибута.

По результатам, представленным в табл. 4, стоит отметить, что в качестве дополнительного критерия возможного сокрытия конфиденциальных данных можно предложить критерий энтропии $H > 3,14$ (любое отклонение больше чем на 3,14 будет признаком измененных значений атрибута rsdiR*).

Из табл. 4 видно, что при выборе $H > 3,14$ вероятность ложноположительного результа-

та равна 20 %, что позволяет использовать это условие в качестве дополнительного критерия наличия измененных данных или стеганографического сокрытия.

Для следующей статистической оценки была построена гистограмма (рис. 3), чтобы провести статистический анализ пар значений по методу, который был предложен А. Фитцманом и А. Вестфелдом для детектирования сокрытия по методу LSB. В работе [14] авторы отметили, что стеганографические системы, основанные на последовательной замене наименее значимых битов, порождают определенного рода искажения, которые могут быть выявлены с помощью классификатора. В процессе внедрения информации с высокой энтропией происходит предсказуемое изменение гистограммы распределения частот.

Для анализа были выбраны три документа с различными характеристиками:

- 1.docx — наибольшее число слов;
- 2.docx — среднее число слов из анализируемых документов;
- 3.docx — наименьшее число слов.

На рис. 3 отражены частоты пар коэффициентов атрибутов оригинальных значений трех документов. Стоит отметить, что распределение частот имеет неравномерный характер, поэтому такое распределение будем считать эталонным для рассматриваемых значений атрибутов.

На рис. 4—6 представлены результаты частотного анализа после вложения данных с использованием алгоритмов A, B и C соответственно.

На рис. 4 визуально заметно выравнивание частот пар соседних коэффициентов, что значительно отличается от оригинальных значений атрибутов.

Результаты, представленные на рис. 5 и 6, показывают наибольшую неравномерность по сравнению с результатами использования алгоритма A.

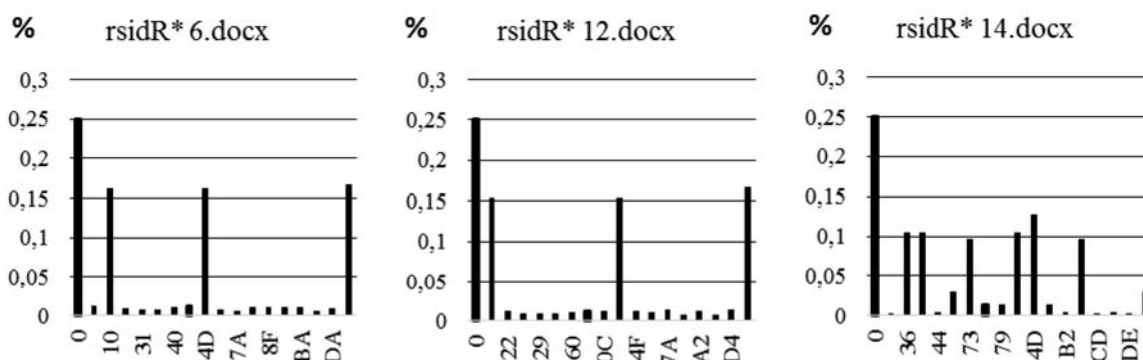


Рис. 3. Результаты частот оригинальных значений

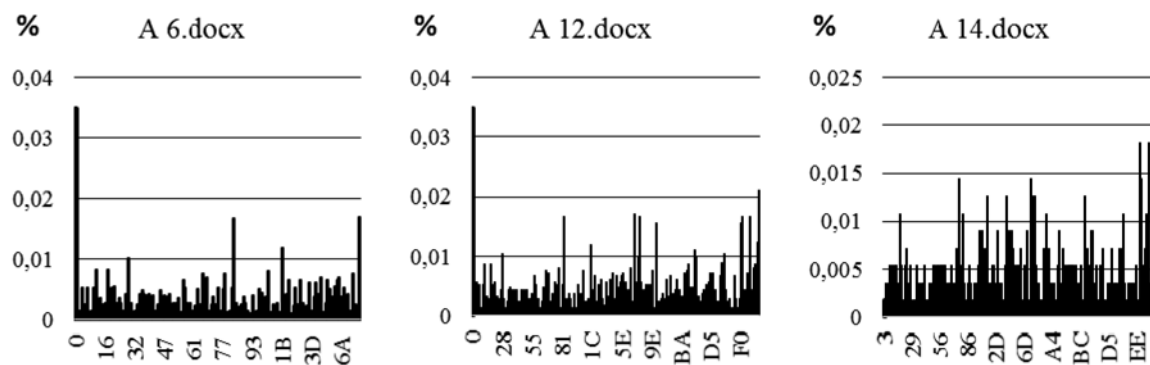


Рис. 4. Результаты частот значений по алгоритму вложения A

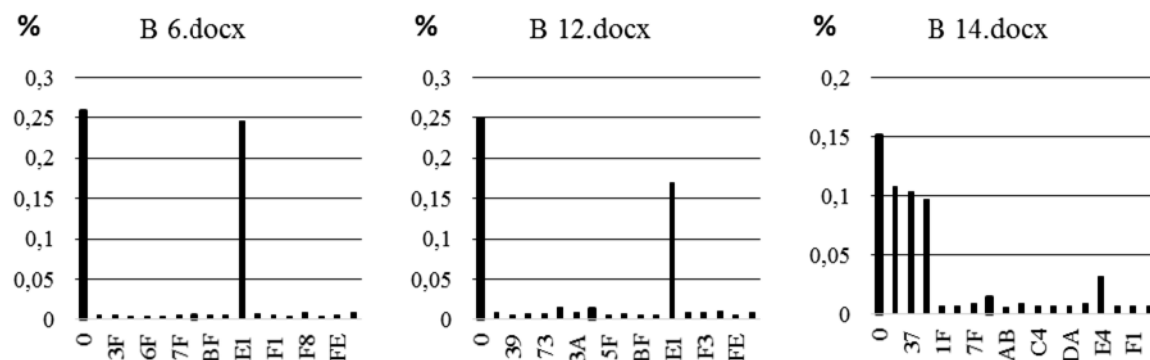


Рис. 5. Результаты частот значений по алгоритму вложения B

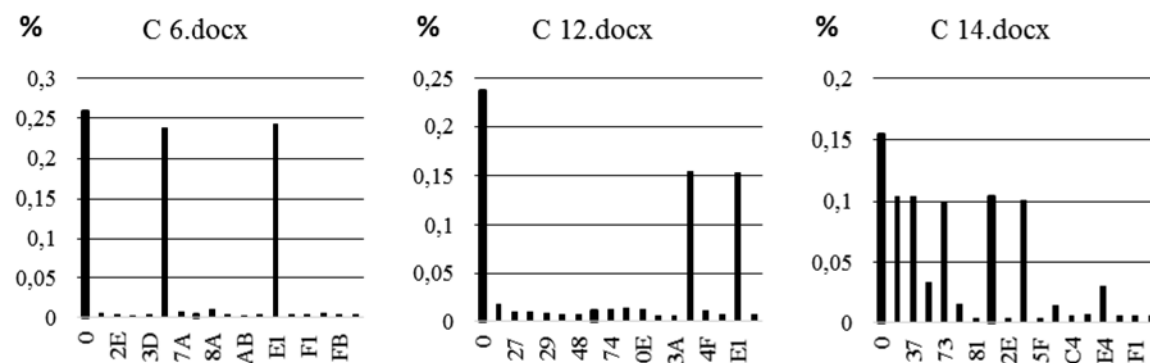


Рис. 6. Результаты частот значений по алгоритму вложения C

Анализ приведенных данных позволяет сделать вывод, что доля оригинальных первых четырех значений превышает 65 %, а доля данных, в которые были внесены изменения, в большинстве случаев не достигает 60 %. Результаты анализа представлены в табл. 5.

Представленные результаты рассмотрены в виде процентного соотношения первых четырех значений от общего числа. По приведенным в табл. 5 результатам вероятность ложноположительного результата равна 33 %, что позволяет использовать эту оценку в качестве дополнительного критерия обнаружения скрытого вложения.

Теперь вычислим χ^2 -квадрат χ^2 по формуле

$$\chi^2 = -\sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}, \quad (2)$$

где χ^2 — совокупная статистическая характеристика Пирсона, которая асимптотически приближается к распределению χ^2 ;

O_i — число наблюдений i -го типа;

E_i — ожидаемая (теоретическая) частота i -го типа.

В табл. 6 отображены результаты вычисления χ^2 в анализируемых документах.

Таблица 5

Результаты частотного анализа

Метод	Документы				
	1.docx	2.docx	3.docx	4.docx	5.docx
rsdiR*	61,42 %	89,02 %	64,24 %	42,70 %	78,01 %
A	9,10 %	9,12 %	8,78 %	8,77 %	10,10 %
B	42,66 %	57,47 %	44,81 %	37,24 %	53,60 %
C	53,65 %	71,71 %	56,71 %	39,62 %	60,75 %
Метод	Документы				
	6.docx	7.docx	8.docx	9.docx	10.docx
rsdiR*	73,94 %	39,91 %	84,34 %	68,84 %	66,48 %
A	9,00 %	9,13 %	9,12 %	9,69 %	13,14 %
B	53,66 %	53,66 %	49,57 %	51,54 %	58,05 %
C	68,54 %	77,11 %	67,49 %	75,29 %	62,76 %
Метод	Документы				
	11.docx	12.docx	13.docx	14.docx	15.docx
rsdiR*	76,36 %	72,15 %	61,83 %	68,85 %	66,55 %
A	8,83 %	8,96 %	8,71 %	7,75 %	10,12 %
B	46,90 %	44,61 %	56,11 %	50,63 %	48,08 %
C	60,12 %	56,30 %	59,65 %	56,88 %	62,32 %

Анализируя результаты расчетов, можно заметить, что условие $\bar{\chi}^2 \approx 0,004$ позволяет сделать следующий вывод: если $\chi^2 > 0,005$, то вероятность измененных/вложенных данных равна 87 %, и такой документ может считаться подозрительным.

Заключение

Расчет и отслеживание двух предложенных критериев статистической оценки позволяет зафиксировать факт использования стеганографии в документах типа Microsoft Word. В статье рассмотрены три алгоритма вложения данных для документов формата .docx, которые наиболее очевидны и имеют различную сложность. Расчет энтропии занимает малое время, но имеет достаточно высокую степень ложноположительного результата. Результаты расчета χ^2 позволяют с высокой степенью определить, что документ имеет скрытое вложение. При соблюдении всех критериев вероятность найти документ со стегоконтейнером составляет 99,99142 %. Таким образом, данные ме-

Таблица 6

Результаты χ^2 -анализа

Метод	Документы				
	1.docx	2.docx	3.docx	4.docx	5.docx
rsdiR*	0,00048	0,00470	0,00275	0,00141	0,00322
A	0,40882	0,42425	0,41488	0,38648	0,40953
B	0,00848	0,23497	0,16858	0,05375	0,06612
C	0,10897	0,01457	0,00861	0,01028	0,05221
Метод	Документы				
	6.docx	7.docx	8.docx	9.docx	10.docx
rsdiR*	0,00386	0,00284	0,00734	0,00439	0,00134
A	0,41331	0,42431	0,42425	0,41815	0,37958
B	0,06429	0,19377	0,01162	0,01967	0,01785
C	0,01120	0,00686	0,02646	0,00023	0,01832
Метод	Документы				
	11.docx	12.docx	13.docx	14.docx	15.docx
rsdiR*	0,00026	0,00038	0,00435	0,00894	0,00355
A	0,38898	0,45219	0,38648	0,38565	0,37611
B	0,02369	0,03636	0,08367	0,21287	0,00002
C	0,02255	0,02621	0,20285	0,25384	0,19348

тоды позволяют минимизировать риск утечки конфиденциальных данных с использованием стеганографии в документах формата .docx.

Список литературы

1. Oleshchenko V., Pevnev V. Development of digital steganography techniques for copyright protection // Advanced Information Systems, 2017, Vol. 1. P. 57–60.
2. Naik R., Gaonkar M. N. Data Leakage Detection in cloud using Watermarking Technique // 2019 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI), Tamil Nadu, India. 2019. P. 1–6. doi:10.1109/ICCCI.2019.8821894.
3. Farina A., Testa D., Pirozzi A. Ursnif: Long Live the Steganography. Roma, Yoroi Blog, Yoroi company, 2019.
4. Kopeytsev V. Steganography in attacks on industrial enterprises // Kaspersky ICS CERT. Kaspersky Lab, Moscow, 2020.
5. Kumar S. Singh A., Kumar M. Information hiding with adaptive steganography based on novel fuzzy edge identification // Defence Technology. 2019. Vol. 15. P. 162–169. doi:10.1016/j.dt.2018.08.003.
6. ISO 29500-1 Information technology Document description and processing languages Office Open XML File Formats Part 1: Fundamentals and Markup Language Reference, 2016.
7. Lee H. S., Lee H. W. Forgery Detection Mechanism with Abnormal Structure Analysis on Office Open XML based MS-Word File // International journal of advanced smart convergence. 2019. Vol. 8. P. 47–57. doi:10.7236/IJASC.2019.8.4.47.

8. **Shah R., Kesan J.** Interoperability challenges for open standards: ODF and OOXML as examples // *Proc. 10th Annual International Conference on Digital Government Research: Social Networks: Making Connections between Citizens, Data and Government*. 2009. P. 56–62.

9. **Lua Lee H., Lee H. W.** Hidden Message Detection in MS-Word File by Analyzing Abnormal File Structure // *2020 International Conference on Green and Human Information Technology (ICGHIT) IEEE*. 2020. P. 54–57. doi:10.1109/ICGHIT49656.2020.00021.

10. **Al-Sharif Z., Towards A.** the memory forensics of MS word documents // *Information Technology-New Generations*, Cham: Springer, 2018. P. 179–185.

11. **Mohamed M. A.** A novel method to protect content of microsoft word document using cryptography and steganography

// *International Journal of Computer Theory and Engineering*. 2015. Vol. 7, N. 4. P. 292.

12. **Luo W., Huang F., Huang J.** Edge adaptive image steganography based on LSB matching revisited *IEEE // Trans Inf Forensics Secur.*, 2010. Vol. 5 (2) P. 201–214. doi:10.1109/TIFS.2010.2041812.

13. **Castiglione A., D'Alessio B., Santis A. D., Palmieri F.** Hiding information into OOXML documents: New steganographic perspectives // *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*. 2011. Vol. 2, N. 4. P. 25.

14. **Westfeld A., Pfitzmann A.** Attacks on steganographic systems // *International workshop on information hiding*, Cham: Springer, Berlin, Heidelberg. 1999. P. 61–76.

P. B. Khorev, Associate Professor, e-mail: pbkh@yandex.ru,

A. V. Sergeev, Post-Graduate Student, e-mail: profitdre@gmail.com,

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation

Property Analysis and Criteria for Detecting Hidden Data in Microsoft Word Documents

In this article, we propose detecting hidden elements in docx documents. Using the feature of the format structure, we analyze the most profitable stegocontainer. It is proposed to consider three options for investing in a stegocontainer in order to obtain the most objective estimates of the deviation. A comprehensive assessment is carried out from the tested data on the basis of which it was proposed to detect hidden elements in Microsoft Word documents.

Keywords: steganography, data hiding, MS-Word, property coding

DOI: 10.17587/it.27.470-477

References

1. **Oleshchenko V., Pevnev V.** Development of digital steganography techniques for copyright protection, *Advanced Information Systems*, 2017, vol. 1, pp. 57–60.

2. **Naik R., Gaonkar M. N.** Data Leakage Detection in cloud using Watermarking Technique, *2019 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, Tamil Nadu, India, 2019, pp. 1–6. doi:10.1109/ICCCI.2019.8821894.

3. **Farina A., Testa D., Pirozzi A.** Ursnif: Long Live the Steganography, *Yoroi Blog*, Yoroi company, Roma, 2019.

4. **Kopeytsev V.** Steganography in attacks on industrial enterprises, *Kaspersky ICS CERT*, Kaspersky Lab, Moscow, 2020.

5. **Kumar S., Singh A., Kumar M.** Information hiding with adaptive steganography based on novel fuzzy edge identification, *Defence Technology*, 2019, vol. 15, pp. 162–169, doi:10.1016/j.dt.2018.08.003.

6. ISO 29500-1 Information technology Document description and processing languages Office Open XML File Formats Part 1: Fundamentals and Markup Language Reference, 2016.

7. **Lee H. S., Lee H. W.** Forgery Detection Mechanism with Abnormal Structure Analysis on Office Open XML based MS-Word File, *International journal of advanced smart convergence*, 2019, vol. 8, pp. 47–57, doi:10.7236/IJASC.2019.8.4.47.

8. **Shah R., Kesan J.** Interoperability challenges for open standards: ODF and OOXML as examples, *Proc. 10th Annual*

International Conference on Digital Government Research: Social Networks: Making Connections between Citizens, Data and Government, 2009, pp. 56–62.

9. **Lua Lee H., Lee H. W.** Hidden Message Detection in MS-Word File by Analyzing Abnormal File Structure, *2020 International Conference on Green and Human Information Technology (ICGHIT) IEEE*, 2020, pp. 54–57, doi:10.1109/ICGHIT49656.2020.00021.

10. **Al-Sharif Z., Towards A.** the memory forensics of MS word documents, *Information Technology-New Generations*, Cham: Springer, 2018, pp. 179–185.

11. **Mohamed M. A.** A novel method to protect content of microsoft word document using cryptography and steganography, *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 2015, vol. 7, no. 4, pp. 292.

12. **Luo W., Huang F., Huang J.** Edge adaptive image steganography based on LSB matching revisited *IEEE, Trans Inf Forensics Secur.*, 2010, vol. 5 (2), pp. 201–214, doi:10.1109/TIFS.2010.2041812.

13. **Castiglione A., D'Alessio B., Santis A. D., Palmieri F.** Hiding information into OOXML documents: New steganographic perspectives, *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, 2011, vol. 2, no. 4, pp. 25.

14. **Westfeld A., Pfitzmann A.** Attacks on steganographic systems, *International workshop on information hiding*, Cham, Springer, Berlin, Heidelberg, 1999, pp. 61–76.

В. Л. Афонин, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., e-mail: afoninwl@rambler.ru,

В. В. Слепцов, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр.,

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, г. Москва

Нейронная сеть на основе специальной потенциальной функции для распознавания многофункциональных сигналов

Предлагается в качестве элементов нейронной сети использовать элементы, описываемые специальной потенциальной функцией. Излагаются особенности и характеристики потенциальной функции, которая имеет выходной сигнал, близкий реальному физиологическому нейрону. Дается описание и структура нейронной сети, элементы которой описываются специальной потенциальной функцией. Для исследования нейронной сети и настройки ее элементов предлагается математический аппарат тензорного исчисления. Излагается возможность применения предложенной нейронной сети для распознавания и нахождения областей, имеющих заданные параметры на сложной пространственной поверхности. В качестве примера приводится описание процедуры отыскания специального сигнала, содержащегося в многофункциональном сигнале.

Ключевые слова: потенциальная функция, вейвлеты, нейронная сеть, тензор, тензорное исчисление

Введение

Аппарат искусственных нейронных сетей нашел широкое применение в задачах распознавания объектов, в решении задач обучения и интеллектуального управления [1–3]. В качестве искусственного нейрона рассматривается элемент, представляющий сигмоидную функцию. Предложенный элемент нейронной сети и теоретические основы построения персептрона, разработанные Ф. Розенблатом [4], являются основой современных искусственных нейронных сетей. Наиболее полное описание искусственных нейронных сетей и области их применения представлены в работе [5]. В данной работе приведены основные публикации о применении нейронных сетей для распознавания в интеллектуальных системах управления. Однако представление нейронной сети является упрощенным, так как сигмоидная функция характеризуется только одним элементом — коэффициентом усиления. Реальный физиологический нейрон по своим функциональным характеристикам обладает существенно большими возможностями [6]. Поэтому в данной работе предлагается в качестве элемента нейронной сети использовать специальную потенциальную функцию [7, 8]. Предлагаемый элемент имеет выходной сигнал, наиболее близкий физиологическому нейрону,

а, кроме того, характеризуется многопараметрическим вектором состояния. Это позволяет, применив математический аппарат тензорного исчисления, использовать нейронные сети для описания базы знаний и базы данных в интеллектуальных системах, а также применить аппарат нейронных сетей для принятия решений.

1. Специальная потенциальная функция как элемент нейронной сети

Из всего многообразия потенциальных функций рассмотрим потенциальную функцию, пропорциональную первой производной от функции $\arctg x$, которая в дискретном виде позволяет в виде суммы описывать сложные произвольные функции и строить нейронные сети:

$$\varphi(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{d}{dx} (\arctg x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{1+x^2}. \quad (1)$$

Представление (1) в дискретном виде [7] позволяет рассматривать ее как элемент нейронной сети

$$\varphi_{jn}(x) = 2^{j/2} \varphi(2^j x - n) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[\frac{2^{j/2}}{1 + (2^j x - n)^2} \right], \quad (2)$$

где $\sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot 2^{j/2} = C(j)$ — коэффициент, характеризующий амплитуду импульсного сигнала;

j — параметр, характеризующий ширину импульсного сигнала; n определяет сдвиг сигнала и характеризует задержку непрерывного сигнала.

Таким образом, функция (2) характеризует элемент нейронной сети, в котором параметры C, j и n являются переменными управляемыми параметрами (рис. 1)

Элемент сети характеризуется вектором

$$\mathbf{P} = [C, j, n]^T.$$

Параметры C, j, n вектора $\mathbf{P}$ настраиваются в зависимости от распознаваемого сигнала $f(x)$, который представляется в виде ряда, составленного из потенциальных функций [7]:

$$R(j, x, n) = \sum C(j, n) \frac{1}{1 + (2^j x - n)^2}, \quad (3)$$

где коэффициент $C(j, n)$ для распознаваемого сигнала $f(x)$ определяется из выражения

$$C(j, n) = \sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \delta\left(x - \frac{n}{2^j}\right) dx, \quad (4)$$

где $\delta\left(x - \frac{n}{2^j}\right)$ — функция Дирака в точках $x = n$.

Параметры j, n выбираются исходя из вида анализируемого сигнала $f(x)$. Параметр n принимает целочисленные значения, определяет сдвиг функции $f(x)$ в каждой конкретной точке x_i , и каждое последующее значение $n(i + 1)$ меняется на величину Δn :

$$n(i + 1) = n(i) + \Delta n. \quad (5)$$

Потенциальная функция (2) не ортогональна по отношению к сдвигу [7], поэтому необходимо выбирать значения j и Δn таким образом, чтобы в точке x_i (рис. 2) погрешность

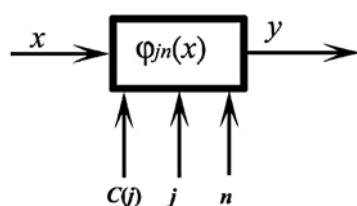


Рис. 1

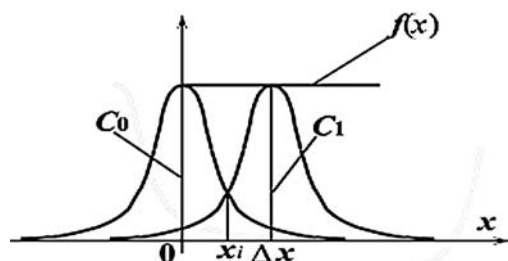


Рис. 2

$\varepsilon(x) = f(x) - R(x)$ имела минимальное значение. Из соотношения (2) следует, что выражение для $\Delta\varphi$ имеет одинаковое значение для любых интервалов $(x(i + 1), x(i) + \Delta x)$, поэтому рассмотрим интервал $(0, \Delta x)$ (рис. 2), для которого максимальная погрешность между $f(x)$ и $R(x)$ существует в точке x_i :

$$\varepsilon_{\max}(x) = f(x) - 2\varphi(x_i). \quad (6)$$

С учетом выражения (6) дискретность задания n определяется как целочисленное значение для Δx :

$$\Delta x = 2(x(\varphi_{\max}) - x_i). \quad (7)$$

Для полученного значения Δx

$$\Delta n_i = \frac{\Delta x}{2^j}. \quad (8)$$

Значение Δn_i (8) округляется до целого в сторону увеличения.

Параметр j выбирается исходя из требования точности аппроксимации рассматриваемой функции $f(x)$ на интервалах изменения функции, когда производная $\frac{f(x)}{dx}$ претерпевает изменение. Таким образом, при использовании потенциальной функции (2) в качестве масштабирующей функции для аппроксимации $f(x)$ необходимо выбирать шаг Δn_i (8), который может быть переменным и большим 1.

Для определения $\varepsilon_{\max}$ на всем интервале существования функции $f(x)$ необходимо определять ε в каждом интервале $(n(i + 1), n(i) + \Delta n)$, и полученное максимальное значение будет наибольшей погрешностью. Для повышения точности аппроксимации ряд (3) может быть представлен в виде суммы нескольких рядов, имеющих разные значения параметра j , и значение n для последующего ряда меняется на величину $\frac{\Delta n}{2^j}$.

В качестве примера рассмотрим аппроксимацию сигнала (рис. 3) в виде вейвлет-ряда (3), где $j = 2, n = 3$ для первого ряда и $n = 3 + \frac{\Delta n}{2^j}$

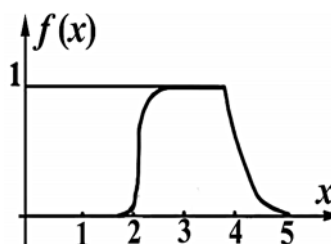


Рис. 3

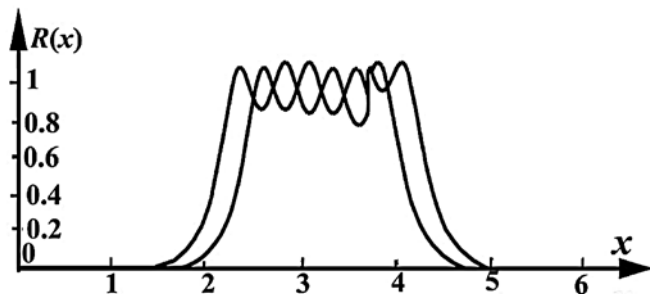


Рис. 4

для второго ряда. Аппроксимация данного сигнала в виде ряда $R(x)$ приведена на рис. 4

Далее рассмотрим нейронную сеть, элементы которой представляют собой потенциальные функции. Параметры каждого элемента данной сети характеризуются вектором $P = [C, j, n]^T$.

2. Построение нейронной сети на основе элементов, представляющих специальную потенциальную функцию

Вейвлет-ряды, построенные на основе масштабирующей функции (3), могут быть представлены в виде нейронной сети, которая способна распознавать сложные сигналы. Элементы данной сети описываются специальной потенциальной функцией вида (2), которая, как было отмечено выше, близка к выходному сигналу физиологического нейрона [6]. Это позволяет существенно расширить возможности сети и применить тензорное исчисление для математического описания нейронной сети, способной распознавать сигналы сложной формы, описывать базу данных и базу знаний интеллектуальной системы управления, а также принимать решения на основе имеющейся информации.

Нейронная сеть, реализующая сигналы (рис. 4), изображена на рис. 5, 6 в системе MATLAB-Simulink в виде суммы двух сигналов: первый изображен на рис. 5, второй имеет структуру, аналогичную первому, но Δn принимает значение $\frac{\Delta n}{2^j}$. Элементы сети $R(x)$ (см. рис. 5) имеют масштабирующую функцию (2). Для представления произвольной функции $f(x)$ в виде нейронной сети и повышения точности аппроксимации возможно использование нескольких слагаемых ряда $R(x)$ (рис. 6), имеющих значения $\frac{\Delta n}{2^j}$.

Для исследования произвольной нейронной сети целесообразно использовать тензорное исчисление. Тензорная форма представления

нейронной сети включает входное воздействие, представляющее матрицу-столбец ($m \times 1$):

$$U^1 = \begin{bmatrix} u^{11} \\ u^{12} \\ u^{13} \\ \vdots \\ u^{1m} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где каждый элемент матрицы входного воздействия $u^i(t)$ представляет линейно возрастающее воздействие $u^i(t) = \int_0^\infty 1 \cdot dt$, сдвинутое относительно друг друга на величину $\frac{\Delta n}{2^j}$.

Индексы каждого элемента матрицы (9) характеризуют: первая цифра — входной сигнал, вторая — номер элемента (1, ..., m).

Выходной сигнал представляет матрицу размерности ($k \times 1$):

$$U^2 = \begin{bmatrix} u^{21} \\ u^{22} \\ u^{23} \\ \vdots \\ u^{2k} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

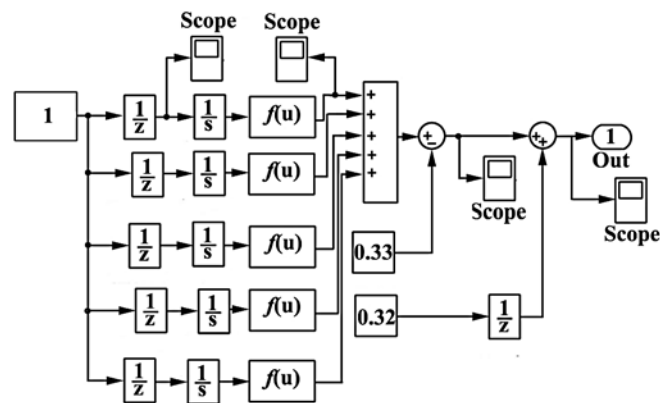


Рис. 5

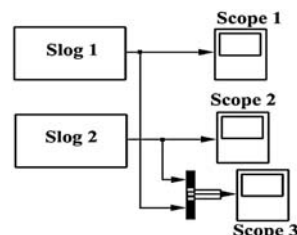


Рис. 6

Для примера, приведенного на рис. 6, $k = 2$. Индексы элементов матрицы (10) характеризуют: первая цифра — выходной сигнал, вторая — номер элемента (1, ..., k).

Связь между матрицами U^2 и U^1 характеризуется тензором, элементы которого определяют параметры вейвлет-ряда, описывающего $f(x)$, где каждый элемент тензора ${}^k f_m(C, j, n)$ представляет масштабирующую функцию (2), которая и характеризуется вектором $P = [C, j, n]$. Индексация элементов тензора означает: нижний индекс справа — входной сигнал, верхний слева — выходной сигнал.

В частном случае:

$${}^k T_m = \begin{bmatrix} {}^1 f_1(C, j, n) & {}^1 f_2(C, j, n) & {}^1 f_3(C, j, n) & {}^1 f_4(C, j, n) & {}^1 f_5(C, j, n) \\ {}^2 f_1(C, j, n) & {}^2 f_2(C, j, n) & {}^2 f_3(C, j, n) & {}^2 f_4(C, j, n) & {}^2 f_5(C, j, n) \\ {}^3 f_1(C, j, n) & {}^3 f_2(C, j, n) & {}^3 f_3(C, j, n) & {}^3 f_4(C, j, n) & {}^3 f_5(C, j, n) \\ {}^4 f_1(C, j, n) & {}^4 f_2(C, j, n) & {}^4 f_3(C, j, n) & {}^4 f_4(C, j, n) & {}^4 f_5(C, j, n) \\ {}^5 f_1(C, j, n) & {}^5 f_2(C, j, n) & {}^5 f_3(C, j, n) & {}^5 f_4(C, j, n) & {}^5 f_5(C, j, n) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

и тогда

$$U^2 = {}^2 T_1 \cdot U^1, \quad (12)$$

где вектор U^1 имеет размерность, равную 5.

В тензорном представлении нейронной сети для повышения точности реализации $f(x)$ в виде ряда $R(x)$ последовательно повышается число слагаемых сумм и соответственно увеличивается размерность матрицы выходного сигнала $k \rightarrow \infty$.

Далее рассмотрим возможность использования рассматриваемой нейронной сети и тензорного исчисления для решения задачи распознавания сложных поверхностей и нахождения участков поверхности, обладающих заданными геометрическими параметрами.

3. Распознавание сложных поверхностей и определение областей с заданными геометрическими параметрами

При воспроизведении и обработке сложных поверхностей возникает задача распознавания участков поверхности, обладающих заданными геометрическими параметрами. Кроме этого, при обработке сложных поверхностей требуется выделять участки поверхности, имеющие заданную шероховатость. В частности, задача распознавания геометрических параметров сложных поверхностей возникает при ис-

пользовании робототехнических комплексов для выполнения операций финишной обработки пера лопаток газотурбинных двигателей.

При решении данных задач поверхность рассматривается в трехмерном пространстве. Сложная поверхность представляется в декартовой системе координат, когда на плоскости в системе координат (x, y) задается произвольная область, каждая i -я точка которой имеет координату z_i . При анализе шероховатости аналогично для заданной области на плоскости определены микроотклонения координаты Δz_i .

Координаты z_i и отклонения Δz_i рассматриваются в сечении, когда либо $x = \text{const}$ либо

$y = \text{const}$. Следует отметить, что решение рассматриваемой задачи возможно при представлении масштабирующей функции как функции от двух переменных x, y :

$$\begin{aligned} \varphi_{jn}(x, y) &= 2^{j/2} \varphi(2^j x - n_x) \varphi(2^j y - n_y) = \\ &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[\frac{2^{j/2}}{(1 + (2^j x - n_x)^2)(1 + (2^j y - n_y)^2)} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Допустим, дана нейронная сеть, описывающая некоторую область T^i , обладающую заданными характеристиками, и требуется на исследуемой поверхности T^k отыскать участки, имеющие характеристики, совпадающие с характеристиками заданной области T^i . Заданная область T^i определяется тензором

$${}^{ki} T_{mi} = \begin{bmatrix} {}^1 f_1(C, j, n) & {}^1 f_2(C, j, n) & {}^1 f_3(C, j, n) \\ {}^2 f_1(C, j, n) & {}^2 f_2(C, j, n) & {}^2 f_3(C, j, n) \\ {}^3 f_1(C, j, n) & {}^3 f_2(C, j, n) & {}^3 f_3(C, j, n) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Следует отметить, что индексы, стоящие при тензоре, не определяют его размерность. В соответствии с принятыми обозначениями в тензорном исчислении место индекса определяет его тип: ковариантный либо контравариантный. В нашем случае рассматриваются ковариантные тензоры, которые отображают преобразование координат, аналогичные преобразованию единичных векторов.

Таким образом, требуется на всей исследуемой поверхности T^k , представленной тензором

$${}^k\mathbf{T}_m = \begin{bmatrix} {}^1f_1(C, j, n) & {}^1f_2(C, j, n) & {}^1f_3(C, j, n) & {}^1f_4(C, j, n) & {}^1f_5(C, j, n) \\ {}^2f_1(C, j, n) & {}^2f_2(C, j, n) & {}^2f_3(C, j, n) & {}^2f_4(C, j, n) & {}^2f_5(C, j, n) \\ {}^3f_1(C, j, n) & {}^3f_2(C, j, n) & {}^3f_3(C, j, n) & {}^3f_4(C, j, n) & {}^3f_5(C, j, n) \\ {}^4f_1(C, j, n) & {}^4f_2(C, j, n) & {}^4f_3(C, j, n) & {}^4f_4(C, j, n) & {}^4f_5(C, j, n) \\ {}^5f_1(C, j, n) & {}^5f_2(C, j, n) & {}^5f_3(C, j, n) & {}^5f_4(C, j, n) & {}^5f_5(C, j, n) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

ших типовых сигналов, который описывается тензором вида (15).

Требуется определить, содержится или не содержится в составе данного сигнала область, описываемая тензором

найти область, соответствующую искомой области T^i , описываемой тензором (14). Для этого последовательно составляется тензор, составленный из скалярного произведения векторов, описывающих элементы тензора (14), и векторов, описывающих элементы тензора, последовательно выбранного из элементов тензора (15), описывающего исследуемую поверхность T^k . Выбор начального тензора осуществляется последовательно, начиная с верхней строки.

Тензор, составленный из скалярных произведений векторов, характеризующих соответствующие элементы тензоров ${}^{ki}\mathbf{T}_{mi}$ и ${}^q\mathbf{T}_g$, имеет вид:

$${}^{ki}\mathbf{T}_{mi} \cdot {}^q\mathbf{T}_g = \begin{bmatrix} {}^{ki}\mathbf{P}_{mi}^{11} \cdot {}^{qi}\mathbf{P}_{gi}^{11} & {}^{ki}\mathbf{P}_{mi}^{12} \cdot {}^{qi}\mathbf{P}_{gi}^{12} & {}^{ki}\mathbf{P}_{mi}^{13} \cdot {}^{qi}\mathbf{P}_{gi}^{33} \\ {}^{ki}\mathbf{P}_{mi}^{21} \cdot {}^{qi}\mathbf{P}_{gi}^{21} & {}^{ki}\mathbf{P}_{mi}^{22} \cdot {}^{qi}\mathbf{P}_{gi}^{22} & {}^{ki}\mathbf{P}_{mi}^{23} \cdot {}^{qi}\mathbf{P}_{gi}^{23} \\ {}^{ki}\mathbf{P}_{mi}^{31} \cdot {}^{qi}\mathbf{P}_{gi}^{31} & {}^{ki}\mathbf{P}_{mi}^{32} \cdot {}^{qi}\mathbf{P}_{gi}^{32} & {}^{ki}\mathbf{P}_{mi}^{33} \cdot {}^{qi}\mathbf{P}_{gi}^{33} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

После "покрытия" всех элементов тензора (15) составляется сумма всех скалярных произведений тензора (16). Сравнением полученных сумм выбирается участок, для которого сумма максимальна. Данный участок из всей исследуемой поверхности (15) будет соответствовать искомой области (14).

В качестве примера рассмотрим произвольный сигнал, представляющий набор сигналов: прямоугольные импульсы, гладкие сигналы, а также всплески короткой длительности и ограниченной амплитуды. Исследуемый сложный сигнал представляет набор сигналов, которые трудно представить в виде гармонической суммы, либо в виде суммы прямоугольных импульсов. Поэтому воспользуемся сигналами, представляющими вейвлет вида потенциальной функции переменной длительности и амплитуды.

Требуется выбрать сигнал, удовлетворяющий заданным характеристикам.

Пример

Дан сложный сигнал, вид которого представлен на рис. 7, включающий набор простей-

$${}^{ki}\mathbf{T}_{mi} = \begin{bmatrix} 6,6 & 0,2 & 7,5 & 1,4 & 8,8 \\ 7 & 7 & 7 & 7 & 7 \\ 0,001 & 0,002 & 0,003 & 0,004 & 0,005 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Тензор характеризует область, где первая строка представляет коэффициенты C для интервала в пределах одной секунды с дискретностью $\Delta = 0,2$ с, вторая строка с аналогичным интервалом времени задает значение параметра j и третья строка задает сдвиг — параметр n .

Далее последовательно из тензора (15) выбираются тензоры размерности, соответствующей тензору (17). Из столбцов выбранного тензора и тензора (17) составляются скалярные произведения. Полученные скалярные произведения суммируются. После определения сумм скалярных произведений для различных

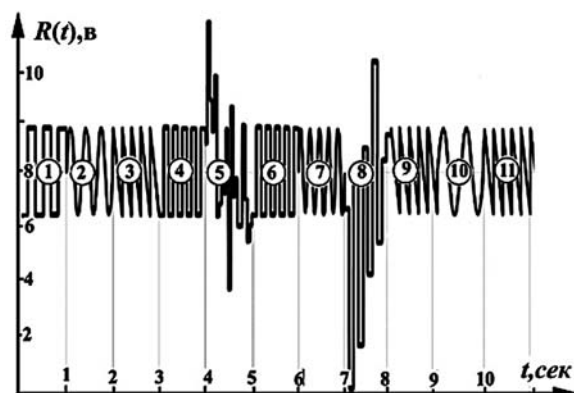


Рис. 7

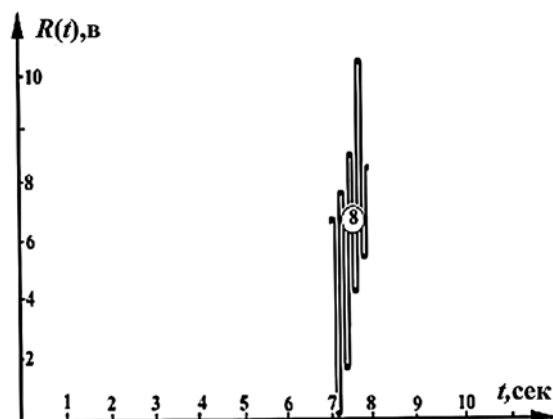


Рис. 8

участков исследуемой поверхности определяется участок, имеющий максимальную сумму (для исследуемого сигнала этот участок показан на рис. 8). Следовательно, участок 8 функции (см. рис. 7) по своим параметрам соответствует сигналу, описываемому тензором (17).

Таким образом, данный исследуемый сигнал (см. рис. 7) на участке 8 имеет параметры, соответствующие отыскиваемой области (описываемой тензором (17)), и время его возникновения $t = 7$ с.

Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- использование элементов, описываемых специальной потенциальной функцией, является новым направлением в развитии теории нейронных сетей;
- представление сигналов в виде вейвлет-ряда, в отличие от существующих методов представления функций, позволяет не только распознавать сигналы, но также определять место возникновения особенностей, а для функций, зависящих от времени, определять момент времени их возникновения;

- тензорное исчисление и нейронные сети на базе предложенной потенциальной функции позволяют представлять базу данных и базу знаний применительно к интеллектуальным системам;
- предложенные нейронные сети и тензорное исчисление позволяют принимать решения на основе полученной информации с датчиков, в частности, для интеллектуальных технологических систем при выборе технологического процесса.

Список литературы

1. Тарин Р. Создаем нейронную сеть. М.: Вильямс, 2018. 272 с.
2. Кан К. А. Нейронные сети. Эволюция. М.: ЛитРес, 2018. 380 с.
3. Афонин В. Л., Илюхин Ю. В. Интеллектуальное управление в робототехнике и мехатронике / Учеб. пособ. М.: ФГБОУ ВО МГТУ "СТАНКИН", 2018. 220 с.
4. Джонсон М. Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях. М.: ДМК Пресс, 2006. 312 с.
5. Розенблатт Ф. Перцептрон—воспринимающий и распознающий автомат. Авиационная лаборатория Корнелла, 1957. Отчет. С. 85—460.
6. Антонов Ю. Г., Котова А. Б., Пустовойт О. Г., Тушенков Л. И. Элементы теории нейрона. (Нейрон. Математика. Моделирование). Киев.: Наука Думка, 1966. 112 с.
7. Афонин В. Л., Чепелев В. М. Метод потенциальных функций для построения вейвлет-рядов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 2. С. 104—114.
8. Афонин В. Л., Чепелев В. М. Вейвлет-преобразования на основе потенциальных функций в задачах распознавания образов // Изв. РАН. ТиСУ. 2009. № 6. С. 94—105

V. L. Afonin, Dr. Tech. Sci., Chief Researcher, e-mail: afoninwl@rambler.ru,

V. V. Sleptsov, Dr. Tech. Sci., Chief Researcher,

Institute of Machines Science named A. A. Blagonravova Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

Neural Network Based on the Special Potential Function for the Recognition of the Multifunctional Signal

The article suggests using elements described by a special potential function as elements of a neural network. The article describes the features and characteristics of a potential function that has an output signal close to a real physiological neuron. The description and structure of a neural network is given, the elements of which are described by a special potential function. To study the neural network and configure its elements, a mathematical apparatus of tensor calculus is proposed. The article describes the possibility of using the proposed neural network for recognizing and finding areas with specified parameters on a complex spatial surface. As an example, we describe the procedure for determining an area on a complex surface that has the specified geometric and qualitative characteristics.

Keyword: *potential function, neural network, tensor, tensor calculus*

DOI: 10.17587/it.27.478-483

References

1. Tarin R. Creating a neural network, Moscow, Publishing house "Williams", 2018, 272 p. (in Russian).
2. Kan K. A. Neural network. Evolution, Moscow, Publishing house "Litres", 2018, 380 p. (in Russian).
3. Afonin V. L., Ilyukhin Yu. V. Intelligent control in robotics and mechatronics, Moscow, Publishing house of MSTU "STANKIN", 2018, 220 p. (in Russian).
4. Johnson M. T. Programming artificial intelligence in applications, Moscow DMC Press, 2006. 312 p. (in Russian).

5. Rosenblatt F. Perceptron воспринимать и распознающий автомат. Aeronautical laboratory of Cornell. One thousand nine hundred fifty seven, Report, pp. 85—460 (in Russian).
6. Antonov Yu. G., Kotova A. B., Pustovoyt O. G., Tushenkov L. I. Elements of the neuron theory. (Neuron. Mathematics. Modeling), Kiev, Nauka Dumka, 1966, 112 p. (in Russian).
7. Afonin V. L., Chepelev V. M. Method of potential functions for constructing wavelet series, *Izvestiya RAS. Theory and control systems*, 2008, no. 2, pp. 104—114 (in Russian).
8. Afonin V. L., Chepelev V. M. Wavelet transformations based on potential functions in image recognition problems, *Izv. RAS. TISU*, 2009, no. 6, pp. 94—105 (in Russian).

О. Г. Щербань, канд. техн. наук, доц., e-mail: shchero@mail.ru,
Д. М. Лазуренко, ст. науч. сотр., e-mail: dmlazurenko@sfnedu.ru,
И. В. Щербань, д-р техн. наук, проф., e-mail: shcheri@mail.ru,
Н. Е. Кириленко, мл. науч. сотр., e-mail: nikolai-kirilenko@mail.ru,
Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

Синтез адаптивного фильтра для автоматической детекции и локализации по оси времени премоторных ЭЭГ-паттернов мозга человека¹

Синтезирован адаптивный фильтр нижних частот в целях автоматической детекции премоторных паттернов мозга человека в записях электроэнцефалограмм (ЭЭГ). Фильтр реализован на основе аппарата многомерного сингулярного анализа. Эффективная полоса пропускания синтезированного фильтра максимально соответствует спектру искомым премоторным ЭЭГ-паттернов на наблюдаемой в текущий момент времени временной выборке, что обеспечило надежный автоматический поиск паттернов и корректное определение их временных границ. Правильность полученных решений подтверждена в ходе экспериментов, в которых приняли участие 24 добровольца.

Ключевые слова: адаптивный фильтр нижних частот, многомерный сингулярный спектральный анализ, автоматический поиск, премоторные ЭЭГ-паттерны мозга человека, метрика Хаусдорфа

Введение

Научно-методические подходы к поиску в записях многомерных сигналов случайных априорно неопределенных структур неизвестных временных флуктуаций некоторых частотных осцилляторов разной интенсивности — паттернов — в настоящее время достаточно хорошо изучены [1–4]. Например, широко используется аппарат, где за счет оконного преобразования Фурье или посредством дискретного или непрерывного вейвлет-преобразований осуществляется переход из временного представления к частотно-временному, а затем осуществляется поиск паттернов на основе применения различных критериальных функций [5–7]. Главным препятствием для автоматизированной детек-

ции и локализации по оси времени премоторных ЭЭГ-паттернов мозга человека является их маскирование спонтанными осцилляциями физиологических ритмов, не связанных со спецификой реализуемой деятельности.

Известно, что характеристики специфических паттернов ЭЭГ, регистрируемых в условиях произвольной двигательной и идеомоторной активности человека, их частотный спектр и амплитуда зависят от характера реализуемой деятельности — зрительной или кинестетической [8]. Кроме того, частотный спектр целевых паттернов определяется текущим психофизиологическим и функциональным состоянием человека, а также тем, к какому типу движения ведется подготовка — реальному или мысленному [9], произвольному или баллистическому (спонтанному) [10]. Таким образом, как правило, частотный состав и спектр мощности специфических ЭЭГ-паттернов биоэлектрической активности мозга человека заранее неизвестен, поскольку определяется достаточно большой совокупностью неконтролируемых, неизвест-

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Постановления №218 "Создание программного комплекса для управления человеческим капиталом на основе нейротехнологий для предприятий высокотехнологичного сектора Российской Федерации" (Шифр: 2019-218-11-8185).

ных исследователю случайных факторов. Помимо этого модальные частоты осцилляторов различных ритмов мозга могут демонстрировать весьма высокую вариативность даже в ходе одной экспериментальной серии, в том числе в связи с развитием утомления и монотонии [11]. Нестационарность, а также априорная неопределенность параметров специфических ЭЭГ-паттернов, сопровождающих произвольную двигательную и идеомоторную активность человека, обуславливают проблемы их детекции, интерпретации и классификации.

Рассмотрен метод синтеза адаптивного фильтра нижних частот, использование которого позволило реализовать алгоритм автоматической детекции и локализации по оси времени премоторных ЭЭГ-паттернов мозга человека. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтвердившие правильность принятых решений.

1. Формализация задачи детекции премоторных ЭЭГ-паттернов

Регистрация многомерной ЭЭГ $S(t) = (S_1(t) S_2(t) \dots S_J(t))^T$ осуществляется в моменты времени $t \in [t_0, t_k]$ на J стандартных отведениях, где t_0 и t_k — начальный и конечный моменты времени измерений; T — знак транспонирования. В составе ЭЭГ предполагается наличие ряда узкополосных ЭЭГ-паттернов, специфическим образом отражающих произвольную премоторную активность человека, связанную с подготовкой к выполнению движений.

Детекция паттернов активности традиционно осуществляется на основе сравнения двух соседних скользящих, частично перекрывающихся, временных окон, существенно меньших интервала измерений $T = t_k - t_0$. Временной интервал T при этом выбирается из априорных сведений о длительности искомого паттерна $T_p = t_{k,p} - t_{0,p}$, где $t_{0,p}$ и $t_{k,p}$ — временные границы паттерна, таким, чтобы T и T_p были примерно равными, но гарантированно $T < T_p$.

Критериальная функция поиска должна при этом отражать степень динамических различий многомерных ЭЭГ во временной области для каждой соседней скользящей пары окон. Если в каком-либо из окон присутствует начальная или конечная граница паттерна активности, то критериальная функция должна отражать этот факт.

Достаточная для поиска низкоамплитудных паттернов активности чувствительность функции поиска обычно обеспечивается за счет пред-

варительной фильтрации исходной многомерной ЭЭГ $S(T)$ в целях выделения того частотного диапазона, который бы максимально соответствовал спектру частот искомым паттернов активности. Известно, что в ходе многократных реализаций одного и того же типа движения одним добровольцем частотный диапазон искомых узкополосных паттернов ЭЭГ биоэлектрической активности может значительно модифицироваться [12]. Ясно, что вследствие подобных случайных флуктуаций, неопределенности частотных характеристик искомых паттернов применение фильтров с априорно заданными параметрами не позволяет обеспечить достаточную чувствительность критериальных функций поиска. Поэтому синтезируемый частотный фильтр должен обладать свойством адаптивности, возможностью автоматической подстройки к частотным характеристикам искомых премоторных паттернов в реальном времени измерений.

2. Синтез адаптивного фильтра нижних частот

Как известно, методы адаптивной фильтрации успешно применялись и ранее, в частности, для режекции артефактов немозгового происхождения [13], а также комплексов пик—волна, характерных для эпилепсии [14], частотные характеристики которых изучены достаточно детально, однако демонстрируют известную изменчивость. В работе [15] на основе аппарата многомерного сингулярного анализа (*Multi-channel Singular Spectrum Analysis, MSSA*) синтезирован полосовой фильтр, адаптивный к вариациям характеристик наблюдаемого сигнала. Его применение в задаче поиска паттернов низкой интенсивности в составе зашумленных сигналов обеспечило требуемую чувствительность критериальной функции поиска. В отличие от традиционных фильтров, основанных на преобразовании Фурье [7], дискретном или непрерывном вейвлет-разложениях сигналов [16], *MSSA*-фильтры обладают адаптивностью к изменениям характеристик исходного сигнала.

Применив аппарат *MSSA* (см. Приложение), исходную многомерную ЭЭГ $S(T)$ набором из M фильтров, первый из которых представляет собой фильтр нижней частоты (ФНЧ), а остальные $(M-1)$ — полосовые фильтры (ПФ), можно разделить на M временных рядов:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_1(T) &= (\tilde{S}_{1,1} \tilde{S}_{2,1} \dots \tilde{S}_{J,1})^T, \dots, \tilde{S}_M(T) = \\ &= (\tilde{S}_{1,M} \tilde{S}_{2,M} \dots \tilde{S}_{J,M})^T, \end{aligned} \quad (1)$$

такой же размерности, что и исходная запись $\mathbf{S}$ [15–18]. Частотные спектры $\Delta F_1, \dots, \Delta F_M$ реконструированных компонент (РК) $\tilde{\mathbf{S}}_1, \tilde{\mathbf{S}}_2, \dots, \tilde{\mathbf{S}}_M$ (1) упорядочены по возрастанию. Верхние границы частотных спектров РК удовлетворяют неравенству $f_1^B \leq f_2^B \leq \dots \leq f_M^B$, где $f_M^B = 0,5f_s$; f_s — частота дискретизации ЭЭГ. При этом сумма всех узкополосных РК позволяет восстановить исходную ЭЭГ:

$$\tilde{\mathbf{S}}_1(T) + \tilde{\mathbf{S}}_2(T) + \dots + \tilde{\mathbf{S}}_M(T) = \mathbf{S}(T), \quad (2)$$

а выбор лишь некоторых из них позволяет, фактически, выполнить частотную фильтрацию исходной ЭЭГ [15, 17–20].

Для упрощения процедуры синтеза требуемого адаптивного фильтра, а также исходя из характеристик частотных спектров основных физиологических ритмов человека из всего набора из M фильтров использовали комбинацию из двух первых $MSSA$ -фильтров — ФНЧ и ПФ. В этом случае синтезируемый обобщенный адаптивный фильтр представляет собой фильтр нижних частот, а восстанавливаемый узкополосный сигнал $\mathbf{S}_{SSA}(T)$ — композицию первых двух РК:

$$\mathbf{S}_{SSA}(T) = \tilde{\mathbf{S}}_1(T) + \tilde{\mathbf{S}}_2(T). \quad (3)$$

Варьирование числа фильтров в диапазоне $M \in [2; M_{\max}]$ ведет к изменению полосы пропускания каждого m -го ($m = \overline{1, M}$) фильтра. При этом известно, что MJ отсчетов собственного вектора V_m усредненной выборочной корреляционной матрицы $\mathbf{C}$ (см. пояснения к формуле (П.2) в Приложении), формируемой по траекторной матрице $\mathbf{X}(T)$ (П.1) для $\mathbf{S}(T)$, представляют собой MJ отсчетов импульсной характеристики (ИХ) h_m нерекурсивного фильтра [13]. Частотная характеристика H_m является преобразованием Фурье ИХ

$$H_m(e^{j2\pi f'}) = \sum_{n=0}^{MJ-1} h_{m,n} e^{-j2\pi f'n},$$

где $f' \in [0; 0,5]$ — приведенная частота. Таким образом, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) этого m -го фильтра есть функция числа используемых в $MSSA$ фильтров M :

$$A_m = |H_m(e^{j2\pi f'})| = A_m(f', M). \quad (4)$$

Выбор в соотношении (4) шага приведенной частоты из равенства $f' = 1/f_s$ позволяет рассчитывать значения АЧХ $A_m(f, M)$ в действительной области частот $f \in [0; 0,5f_s]$ с дискретностью 1 Гц. Максимально допустимое число фильтров

определяют из условия $M_{\max} \leq 0,5K$, где $K = Tf_s$ — длина временного ряда $S_j(t) = \{s_{j,k}\}_{k=1}^K$ на каждой j -м ($j = \overline{1, J}$) отведении ЭЭГ $\mathbf{S}(T)$ [21].

АЧХ $MSSA$ -фильтров имеет форму гауссиана и, например, при увеличении M эффективные полосы пропускания фильтров уменьшаются, а их модальные частоты, соответствующие максимумам АЧХ, сдвигаются влево в область нижних частот [18]. При этом соответствующим образом изменяются и частотные спектры компонент $\tilde{\mathbf{S}}_1, \tilde{\mathbf{S}}_2$ и, следовательно, спектр суммарного сигнала $\mathbf{S}_{SSA}$ (3).

Следовательно, представляется возможным подобрать такое число M_{opt} , чтобы спектр узкополосной ЭЭГ $\mathbf{S}_{SSA}$ (3) максимально соответствовал бы спектру частот искомым паттернов активности в каждый момент времени их наблюдения.

Далее мы рассуждали следующим образом. Приняли во внимание, что пространственная локализация ЭЭГ-паттернов определяется видом мыслительной деятельности человека [22]. Так, например, β -частоты от 13 до 35 Гц фронтальной и центральной областей больших полушарий тесным образом связаны с протеканием процессов подготовки к реализации произвольных движений, тогда как частоты γ -диапазона от 30 до 70 Гц демонстрируют высокую дирекционную чувствительность к реализуемому типу двигательной активности, а также коррелируют с процессами селективного внимания, активно проявляются во фронтальных, центральных, височных и теменных областях. Иными словами, измеряемые в одноименные моменты времени компоненты ЭЭГ на $J' < J$ целевых отведениях, включенных в реализацию информационных процессов при подготовке движений, порождены аналогичным физиологическим процессом. Следовательно, допустимым является усреднение соответствующих отсчетов спектральной плотности (СПМ) в целевых (J') отведениях в обобщенном частотном диапазоне основных физиологических ритмов ЭЭГ:

$$\mathbf{P}(f) = \frac{1}{J'} \sum_{j=1}^{J'} P_j(f), \quad (5)$$

где $P_j(f)$ — значения СПМ одномерного сигнала $\{s_{j,k}\}_{k=1}^K$ для каждого отсчета частоты $f \leq 70$ Гц.

Кроме того, был учтен тот факт, что в зависимости от вида когнитивной нагрузки физиологические ритмы ЭЭГ способны демонстрировать разнонаправленные изменения в узких полосах частот. Так, например, подготовка к реализации реального движения со-

проводятся изменениями как в низкочастотных δ -диапазоне (1...4 Гц) и α -диапазоне ЭЭГ (8...12 Гц), так и в более высокочастотных β - и γ_1 -частотах (35...45 Гц) [23]. Поэтому параметры полосового *MSSA*-фильтра подбирали исходя из характеристик самого высокочастотного ритма из всех, связанных с исследуемым процессом подготовки к реализации двигательных актов, регистрируемых в интервале T на отведениях, целевых при выполнении актуальной двигательной задачи.

Так как при изменении M одновременно меняются модальная частота ПФ и эффективная ширина полосы пропускания, то ввели два взаимосвязанных критерия. Модальная частота ПФ f_{bp} должна быть близкой к текущей модальной частоте f_r активного высокочастотного ритма ЭЭГ:

$$f_{bp} = \min_{M=2,3,\dots,M_{\max}} \{ |f_{bp}(M) - f_r| \}, \quad (6)$$

где $f_r = \arg \max_{f_r^{\min} \leq f \leq f_r^{\max}} \{ \mathbf{P}(f) \}$; $f_r^{\min}$, $f_r^{\max}$ — нижняя и верхняя границы ритма, а оптимальное число фильтров выбирается из условия

$$M_{opt} = \arg \min_{M \leq M_{\max}} \left\{ \sum_{f_{bp} \leq f \leq f_r^{\max}} [\tilde{\mathbf{P}}(f) - \tilde{A}_{bp}(f, M)]^2 \right\}, \quad (7)$$

где $\tilde{\mathbf{P}}(f)$ и $\tilde{A}_{bp}(f, M)$ — нормализованные в диапазоне частот $f \in [f_{bp}, f_r^{\max}]$ значения СПМ $\mathbf{P}(f)$ и АЧХ ПФ $A_{bp}(f, M)$. Ритм считали активным, если максимальное значение его СПМ (5) составляло не менее 10 % от СПМ основного тона.

3. Алгоритм детекции паттернов активности

Последующая детекция премоторных ЭЭГ-паттернов в составе реконструированной узкополосной компоненты $\mathbf{S}_{SSA}(T)$ осуществлялась на основе сравнения двух соседних частично перекрывающихся скользящих временных окон, равных по объему и содержащих по $n \ll K$ одноименных отсчетов с каждого j -го ($j = \overline{1, J}$) отведения. Если в каком-либо из окон присутствовал паттерн активности, то этот факт отражала критериальная функция, основанная на расчете метрики Хаусдорфа (МХ) d_H [15, 22, 23]. Таким образом, с дискретностью n отсчетов определяли временные границы начала и окончания паттернов мысленной активности.

Был синтезирован следующий алгоритм детекции и локализации по оси времени эпох, содержащих паттерны активности.

1. На интервале T с частотой дискретизации f_s на J отведениях измеряется ЭЭГ

$$\mathbf{S}(T) = (\{s_{1,k}\}_{k=1}^K \quad \{s_{2,k}\}_{k=1}^K \quad \dots \quad \{s_{J,k}\}_{k=1}^K)^T,$$

представляющая собой многомерный ряд размерности $J \times K$.

2. Для паттерна, наблюдаемого на целевых отведениях и относящегося к наиболее высокочастотному активному ритму, находится текущая модальная частота $f_r(T)$.

3. За счет использования аппарата *MSSA* и решения оптимизационной задачи (5), (6) из исходной ЭЭГ выделяется узкополосный сигнал $\mathbf{S}_{SSA}(T)$ той же размерности $J \times K$ отсчетов, спектр которого максимально соответствует спектру искомым паттернов. Так как при увеличении M полосы пропускания фильтров уменьшаются, а их модальные частоты сдвигаются влево, то в ходе автоматической подстройки значение M следует увеличивать, начиная с минимально возможного и до выполнения условий (5), (6).

4. Многомерный ряд $\mathbf{S}_{SSA}(T)$ делится на K/n перекрывающихся временных окон одинаковых размерностей $J \times n$. Для всех соседних окон рассчитывается МХ d_H . Размер $n \ll K$ временного окна выбирается таким, чтобы априорно известная длительность премоторного паттерна гарантированно превышала значение n/f_s . Тогда, если в каком-либо из соседних окон присутствует начальная или конечная граница паттерна, то критериальная функция d_H имеет локальный максимум.

4. Экспериментальные исследования

Для подтверждения правильности принятых решений проведены экспериментальные исследования, в которых приняли участие 24 здоровых добровольца (16 мужчин и 8 женщин, средний возраст группы — 21,5 года). В соответствии с этическими нормами, утвержденными комитетом по этике Южного федерального университета, все они подписывали протокол о добровольном согласии на участие в исследовании.

В рамках экспериментальной сессии испытуемые в произвольном темпе выполняли реальные движения правой рукой. Движения рукой чередовались с состоянием покоя, когда испыту-



Рис. 1. Временная диаграмма экспериментальной сессии одного добровольца

емый находился некоторое время с открытыми глазами без движений. При этом ЭЭГ регистрировалась постоянно — и в покое и при мысленной подготовке к началу движения. Движения рукой выполнялись с интервалом 5..10 с, по 70 циклов для каждого испытуемого. На рис. 1 показан фрагмент временной диаграммы экспериментальной сессии для одного добровольца. Таким образом, всего подлежали исследованию $24 \times 70 = 1680$ временных выборок мысленной подготовки к движению правой рукой.

Регистрацию ЭЭГ $S(t)$ осуществляли относительно ушных референтных электродов (референт объединенный) с использованием электроэнцефалографа "Энцефалан-131—03" ("Медиком МТД", г. Таганрог) от $J = 17$ стандартных отведений (F7, F8, F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4, O1, O2, T3, T4, T5, T6) в соответствии с международной системой "10—20". Частота дискретизации ЭЭГ составляла 250 Гц по каждому из каналов. За счет режекторного фильтра были удалены первая и вторая гармоники питающей сети 50 и 100 Гц.

Параллельно в области поверхностных мышц, сгибающих предплечье в локтевом суставе (*m. brachioradialis*), и поверхностных сгибателей пальцев (*m. flexor digitorum superficialis*) записывалась электромиограмма (ЭМГ). Таким образом, начальный момент времени реального движения рукой t_k достаточно точно регистрировали по ЭМГ.

Для обнаружения и последующей автоматической режекции артефактов, связанных с движением глаз и морганием, регистрировалась электроокулограмма (горизонтальная и вертикальная).

Для выбранного типа двигательной активности начальный момент времени реального движения рукой t_k , очевидно, совпадает с моментом окончания искомого премоторного ЭЭГ-паттерна, сопряженного с подготовкой к двигательному акту, $t_k = t_{k,p}$. Поэтому в ходе численных исследований выполнялся поиск только начальных границ премоторных паттернов $t_{0,p}$ при подготовке к движению в каждой выборке.

Принято считать, что специфические паттерны мозга, сопряженные с непосредствен-

ной подготовкой конкретного плана реализации произвольных движений не превышают по длительности 500 мс [24]. Для определения латерализации премоторного потенциала и прогнозирования предстоящего движения верхней конечности достаточной является эпоха анализа длительностью 250...300 мс [25]. В связи с этим детекция искомым ЭЭГ-паттернов выполнялась на интервалах $T = 500$ мс, предшествующих моменту фактической инициализации реального движения рукой t_k .

Пример автоматической подстройки параметров ПФ за счет подбора M_{opt} для двух разных добровольцев показан на рис. 2. Здесь сплошными линиями показаны усредненные по целевым отведениям — C3, F3, P3 и O1 ($J' = 4$), нормализованные, сглаженные скользящим ок-

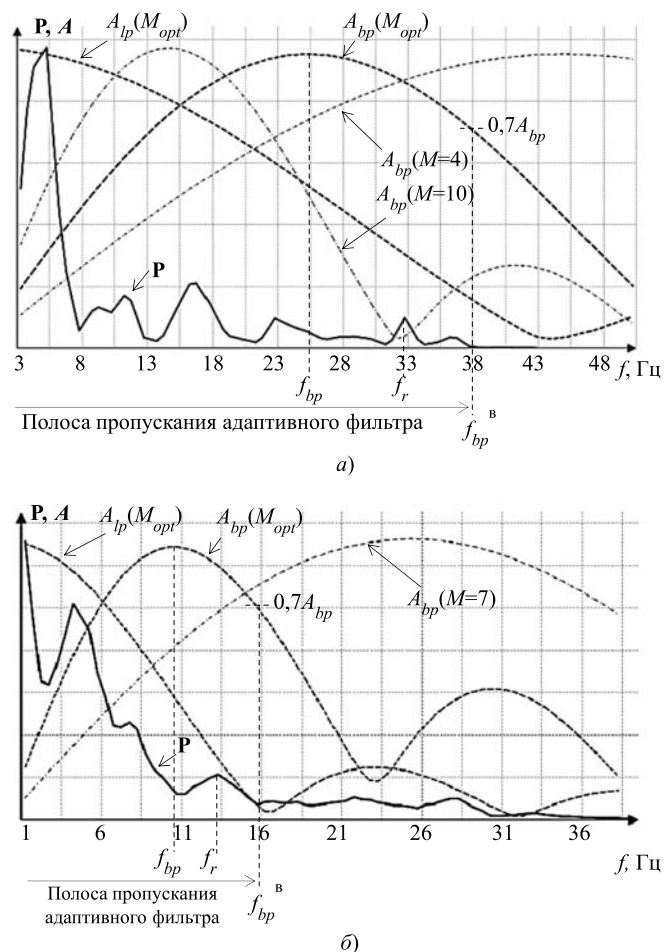


Рис. 2. Нормализованные СПМ (сплошные линии) и АЧХ (пунктирные линии) ФНЧ и ПФ при разных M , рассчитанные для единичной эпохи ЭЭГ, соответствующей подготовке к реализации произвольного движения правой рукой:

а — обследуемый 1, где $M_{opt} = 7$; б — обследуемый 2, где $M_{opt} = 16$

ном, СПМ $\tilde{P}(f)$ (5). Пунктирными линиями на графиках показаны примеры вычисленных в ходе автоматической подстройки при разных значениях M нормализованные АЧХ $MSSA$ -фильтров ФНЧ $\tilde{A}_{lp}(f, M)$ и ПФ $\tilde{A}_{bp}(f, M)$. Видно, что спектральные составы премоторных ЭЭГ-паттернов, зарегистрированных в рамках подготовки к выполнению реального движения, у этих добровольцев значительно отличаются. Так, у добровольца 1 (рис. 2, а) наблюдается значимое/достоверное повышение СПМ в наиболее высокочастотном γ_1 -диапазоне на частотах от 30 до 38 Гц, тогда как у обследуемого № 2 (рис. 2, б) — на границе α - и β -диапазонов на частоте 13 Гц. Таким образом, адаптивный алгоритм позволил получить индивидуальные оптимальные значения M_{opt} для приведенных примеров, равные, соответственно, 7 и 16. На рис. 2 верхняя частота среза ПФ обозначена как f_{bp}^B . Видно, что только при M_{opt} параметры $MSSA$ -фильтров ФНЧ и ПФ в составе синтезированного адаптивного фильтра обеспечивают требуемую полосу пропускания.

При поиске начальной границы паттерна $t_{0,p}$ ширину скользящего окна выбирали равной 100 мс, а коэффициент перекрытия соседних окон — равным 0,9. На рис. 3 показаны фрагменты ЭЭГ по отведениям левого полушария мозга, ответственным за формирование премоторного паттерна правой руки, а также графики ЭМГ и функции d_H . Максимум МХ соответствует начальной границе премоторного паттерна мысленной активности $t_{0,p}$ при подготовке к реальному движению и предшествует метке фактической инициализации двигательного акта на 250 мс.

В ходе экспериментальных исследований найденные моменты начала мысленной актив-

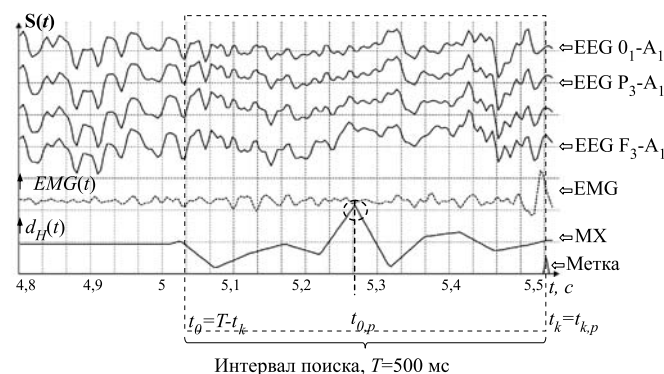


Рис. 3. Фрагменты ЭЭГ с целевыми отведениями ЭЭГ левого полушария, а также графики ЭМГ и функции d_H в рамках анализа единичной эпохи премоторных потенциалов мозга, сопряженных с произвольным движением правой рукой

ности $t_{0,p}$ были случайными даже для одного добровольца. В ходе детализированного анализа было получено, что в интервале $[0, 500]$ мс имеют место значительные флуктуации параметра $t_{0,p}$, сопряженного с временной характеристикой премоторных потенциалов мозга, предшествующих реальному выполнению движений.

Подтвердился также известный факт [12], согласно которому сопряженные с подготовкой к движению частотные диапазоны способны демонстрировать определенную вариативность в рамках оценки единичных (*single trials*) эпох анализа даже в пределах одного обследуемого. Именно по этой причине применение частотных фильтров с априорно заданными параметрами представляется неэффективным.

В целях проверки корректности детектированных временных границ паттернов активности решалась задача бинарной дискретной классификации двух целевых состояний, а именно "Покой" и "Подготовка к выполнению движению". Были использованы стандартные средства машинного обучения.

На первом этапе вычислительных экспериментов набор исходных данных для класса "Подготовка к выполнению движения" содержал одинаковые по длительности эпохи анализа ЭЭГ $S(T)$ на интервалах $T = t_k - t_0 = 500$ мс, предшествующих меткам фактической инициализации реального движения рукой t_k (см. рис. 1 и 3).

К классу "Покой" на обоих этапах вычислений относили выборки эпох ЭЭГ длительностью по 500 мс каждая, отбираемых произвольным образом в каждом цикле экспериментальной серии в интервалах, соответствовавших состоянию оперативного покоя до и после выполнения единичного движения конечностью (см. рис. 1). Таким образом, совокупная выборка экспериментальных данных для класса "Покой" также содержала 1680 единичных примеров.

Для решения задачи классификации специфических электрографических премоторных паттернов ЭЭГ были применены модели на основе опорных векторов (*SVM*), градиентного бустинга деревьев принятия решений (*GBDT*), случайного леса деревьев (*Random forest*) и регуляризованных линейных моделей с обучением стохастическим градиентным спуском (*SGD*) стандартной библиотеки *Python.Scikitlearn*. Выбор наилучших параметров указанных моделей, а также наилучшей модели классификации был осуществлен на первом этапе вычислений. В совокупности было рассчитано и синтезировано около 300 опорных признаков

разных типов — временных, частотных и частотно-временных, а также пространственных. Дополнительно выполнялась стандартизация каждого выделенного признака в наборе данных путем удаления среднего значения и масштабирования его до единичной дисперсии. Выбранные модели классификации обладали достаточной обобщающей способностью, что исключало возможность их недообучения или переобучения. Различия по средней точности классификации в зависимости от вида модели не превышали 5 %. Лучшей оказалась модель классификации *GBDT*, а к наиболее важным признакам чаще всего относились корреляции между фронтальными, центральными, теменно-затылочными отведениями ЭЭГ, рассчитанные для трансформант дискретного вейвлет-преобразования, а также коэффициенты моделей регрессии первого порядка.

Максимальная точность бинарной классификации в ходе кросс-валидации на первом этапе ожидаемо была невысокой и составила всего 69 %. Наблюдались также ожидаемые существенные вариации по точности классификации — от 50 до 84 % в зависимости от исследуемого добровольца. Факт низкой средней точности классификации по всему набору данных на первом этапе объясняется, по всей видимости, тем, что в составе временных выборок $T = 500$ мс класса "Подготовка к движению" присутствуют не только паттерны мысленной активности, связанной с подготовкой к движению, длительность которых оказывается меньшей 500 мс, но также и иные паттерны, никак не связанные с этой мыслительной деятельностью.

Максимальная точность бинарной классификации в ходе кросс-валидации на первом этапе была ожидаемо невысокой и составила всего 69 %. Наблюдались также существенные вариации точности классификации — от 50 до 84 % у разных обследуемых. Межиндивидуальные различия, как известно, вносят существенный вклад при оценке оптимальных для задачи классификации подмножеств ЭЭГ-каналов [26, 27]. Фактически, низкая средняя точность классификации в генеральной совокупности, наблюдаемая на первом этапе вычислений, объясняется, по всей видимости, тем, что в составе эпох анализа $T = 500$ мс класса "Подготовка к выполнению движения" помимо искомым премоторных ЭЭГ-паттернов присутствовали также и иные электрографические паттерны, не связанные с реализацией текущей двигательной задачи.

На втором этапе вычислительных экспериментов эпохи анализа для класса событий "Подготовка к выполнению движения" были пересчитаны и содержали в себе различные по длительности единичные экземпляры данных, временные границы которых соответствовали строго границам премоторных паттернов ЭЭГ, предшествующих реальным движениям $[t_{0,p}, t_{k,p}]$ (см. рис. 2), тогда как выборка экспериментальных данных класса "Покой" осталась прежней. В ходе валидационной проверки модель классификации *GBDT* с аналогичными параметрами, что и на первом этапе вычислительных исследований, была заново обучена, а в ходе кросс-валидации проверена ее точность. На втором этапе точность бинарной классификации повысилась в рамках анализа электрограмм всех без исключения 24 обследуемых в среднем на 11 %. При этом максимальная наблюдаемая точность классификации, рассчитанная отдельно для каждого обследуемого, в ряде случаев, повысилась с 84 до 96 %.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что синтезированный адаптивный фильтр и разработанный на его основе алгоритм обеспечивают эффективное автоматическое детектирование и временную локализацию специфических паттернов ЭЭГ, сопровождающих подготовку к выполнению произвольных движений человеком. Решение построено на гипотезе, согласно которой функция поиска должна отражать факт наличия начальной и конечной границ целевого паттерна в ЭЭГ, генерируемого соответствующими мозговыми структурами [28]. Требуемая чувствительность такой функции достигается за счет применения синтезированного адаптивного фильтра нижних частот, полоса пропускания которого на анализируемой временной эпохе максимально соответствует спектру искомым электрографическим паттернов.

Корректность разработанного метода адаптивной фильтрации ЭЭГ была подтверждена в ходе вычислительных экспериментов, а именно в задаче бинарной классификации состояний "Покой" и "Подготовка к выполнению движения" посредством стандартных средств машинного обучения. Было показано, что при стандартных временных границах (500 мс) премоторных паттернов ЭЭГ, использованных для обучения моделей, средняя точность клас-

сификации была невысокой, в ряде случаев у некоторых обследуемых разделяющая способность классификаторов не превышала случайный уровень 50 %. Можно предположить, что ЭЭГ эпохи анализа, предшествующие на 500 мс фактической инициализации реальных движений, содержали не только искомые премоторные паттерны мозга, но также дополнительные электрографические феномены [29, 30], связанные с обеспечением функционального состояния морфологических мозговых субстратов, задействованных в планировании произвольных форм поведения и двигательной активности.

Новый алгоритм позволил повысить вычислительную способность и точность моделей классификации в среднем на 11 %. При этом точность классификации, рассчитанная отдельно для каждого обследуемого, не опускалась ниже 59 %, а у некоторых участников достигала 96 %.

Разработанный метод может быть положен в основу нового инструментария для решения прикладных задач нейроуправления в контуре интерфейсов "Мозг—компьютер" и "Мозг—Мозг", а также повышения общей надежности функционирования нейроинтерфейсов различного назначения.

Приложение. Алгоритм MSSA

1. По измеренному многомерному ряду

$$\mathbf{S} = (\{s_{1,k}\}_{k=1}^K \quad \{s_{2,k}\}_{k=1}^K \quad \dots \quad \{s_{J,k}\}_{k=1}^K)^T$$

размерности $\dim \mathbf{S} = J \times K$ составляется блочная траекторная матрица

$$\mathbf{X} = (X_1 \mid X_2 \mid \dots \mid X_j \mid \dots \mid X_J), \quad (\text{П.1})$$

$$\text{где } X_j = \begin{pmatrix} s_{j,1} & s_{j,2} & \dots & s_{j,k} & \dots & s_{j,K} \\ s_{j,2} & s_{j,3} & \dots & s_{j,k+1} & \dots & s_{j,K+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{j,M} & s_{j,M+1} & \dots & s_{j,M+k} & \dots & s_{j,N_k} \end{pmatrix} -$$

ганкелева матрица размерности $\dim X_j = M \times K$, формируемая для каждой j -й составляющей в отдельности; M — длина гусеницы (размерности вложения); $N_k = K - M + 1$.

2. Вычисляется восстанавливаемая матрица

$$\tilde{\mathbf{X}}(T) = \sum_{m=1}^M \tilde{\mathbf{X}}_m(T), \quad (\text{П.2})$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{X}}_1 &= (\tilde{X}_{1,1} \mid \tilde{X}_{1,2} \mid \dots \mid \tilde{X}_{1,J}), \\ \tilde{\mathbf{X}}_2 &= (\tilde{X}_{2,1} \mid \tilde{X}_{2,2} \mid \dots \mid \tilde{X}_{2,J}), \dots, \\ \tilde{\mathbf{X}}_M &= (\tilde{X}_{M,1} \mid \tilde{X}_{M,2} \mid \dots \mid \tilde{X}_{M,J}) - \end{aligned}$$

блочные ганкелевы матрицы, порожденные соответствующими собственными векторами V_m усредненной выборочной корреляционной матрицы $\mathbf{C} = 1/N_k(\mathbf{X}\mathbf{X}^T)$; $\mathbf{V} = (V_1 \dots V_m \dots V_{MJ})$ — ортогональная матрица собственных векторов V_m ($\dim(V_m) = (MJ) \times 1$) матрицы $\mathbf{C}$, построенная в результате упорядочения собственных векторов V_m по убыванию их собственных чисел $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{MJ} \geq 0$; $\mathbf{C} = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T$ — сингулярное разложение матрицы $\mathbf{C}$; $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{MJ})$ — диагональная матрица собственных чисел. При этом расчет блоков $\tilde{X}_{m,j}$ восстановленных матриц из (П.2) выполняется следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_{1,1}(T) &= \begin{pmatrix} v_{1,1} \\ v_{2,1} \\ \vdots \\ v_{M,1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_{1,1} \\ p_{2,1} \\ \vdots \\ p_{N_k,1} \end{pmatrix}^T; \dots; \\ \tilde{X}_{1,J}(E) &= \begin{pmatrix} v_{MJ-M+1,MJ-M+1} \\ v_{MJ-M+2,MJ-M+1} \\ \vdots \\ v_{MJ,MJ-M+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_{1,MJ-M+1} \\ p_{2,MJ-M+1} \\ \vdots \\ p_{N_k,MJ-M+1} \end{pmatrix}^T; \dots; \\ \tilde{X}_{M,J}(T) &= \begin{pmatrix} v_{MJ-M+1,MJ} \\ v_{MJ-M+2,MJ} \\ \vdots \\ v_{MJ,MJ} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_{1,MJ} \\ p_{2,MJ} \\ \vdots \\ p_{N_k,MJ} \end{pmatrix}^T, \end{aligned}$$

где $p_{1,1}, p_{2,1}, \dots, p_{k,MJ}$ — элементы матрицы нецентрированных главных компонент.

3. Применение процедур антидиагонального усреднения к каждой из матриц $\tilde{\mathbf{X}}_1, \dots, \tilde{\mathbf{X}}_M$ (П.2) позволяет сформировать M многомерных узкополосных РК $\tilde{\mathbf{S}}_1(T), \dots, \tilde{\mathbf{S}}_M(T)$ (1).

Список литературы

1. **Справочник** по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
2. **Мироновский Л. А.** Функциональное диагностирование динамических систем (обзор) // Автоматика и телемеханика. 1980. № 8. С. 96—121.
3. **Rangayyan R. M.** Biomedical Signal Analysis: A Case-Study Approach. Wiley-IEEE Press, 2007. 440 p.
4. **Abiri R., Borhani S., Sellers E. W., Jiang Y., Zhao X.** A comprehensive review of EEG-based brain—computer interface paradigms // Journal of neural engineering. 2019. Vol. 16(1). 011001.

5. **Щербань И. В., Кириленко Н. Е., Красников С. О.** Метод временной локализации неизвестных высокочастотных осцилляторов в составе зашумленных сигналов на основе непрерывного вейвлет-преобразования // *Автоматика и телемеханика*. 2019. № 7. С. 122–133.
6. **Jusas V., Samuvel S. G.** Classification of motor imagery using combination of feature extraction and reduction methods for brain-computer interface // *Information Technology and Control*. 2019. Vol. 48(2). P. 225–234.
7. **Щербань И. В., Кириленко Н. Е., Щербань О. Г.** Эффективные критериальные функции спектральной энтропии для поиска высокочастотных паттернов в составе зашумленных электрограмм // *Информационно-управляющие системы*. № 2 (93). 2018. С. 8–17.
8. **Lee W. H., Kim E., Seo H. G., Oh B. M., Nam H. S., Kim Y. J., Bang M. S.** Target-oriented motor imagery for grasping action: different characteristics of brain activation between kinesthetic and visual imagery // *Scientific reports*. 2019. Vol. 9(1). P. 1–14.
9. **Chen C., Zhang J., Belkacem A. N., Zhang S., Xu R., Hao B., Ming D.** G-causality brain connectivity differences of finger movements between motor execution and motor imagery // *Journal of healthcare engineering*. 2019. P. 1–12.
10. **Lazurenko D. M., Kirov V. N., Aslanyan E. V., Shepelev I. E., Bakhtin O. M., Minyaeva N. R.** Electrographic Properties of Movement-Related Potentials // *Neuroscience and Behavioral Physiology*. 2018. Vol. 48(9). P. 1078–1087.
11. **Sengupta A.** Study of Cognitive Fatigue using EEG Entropy Analysis // In 2020 International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET). 2020. IEEE. P. 1–6.
12. **Zapala D., Zabielska-Mendyk E., Augustynowicz P., Cudo A., Jaśkiewicz M., Szewczyk M., Francuz P.** The effects of handedness on sensorimotor rhythm desynchronization and motor-imagery BCI control // *Scientific reports*. 2020. Vol. 10(1). P. 1–11.
13. **Kilicarslan A., Vidal J. L. C.** Characterization and real-time removal of motion artifacts from EEG signals // *Journal of Neural Engineering*. 2019. Vol. 16(5). 056027.
14. **Correa A. G., Orosco L. L., Diez P., Leber E. L.** Adaptive filtering for epileptic event detection in the EEG // *Journal of Medical and Biological Engineering*. 2019. Vol. 39(6). P. 912–918.
15. **Щербань О. Г., Щербань И. В., Лобзенко П. В.** Метод поиска высокочастотных паттернов в составе зашумленных многомерных сигналов в реальном времени // *Информационные технологии*. 2020. № 9. С. 507–514.
16. **Смоленцев Н. К.** Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2005. 305 с.
17. **Rodrigues P. C., Mahmoudvand R.** The benefits of multivariate singular spectrum analysis over the univariate version // *Journal of the Franklin Institute*. 2018. Vol. 355(1). P. 544–564. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2017.09.008>.
18. **Данилов Д. Л., Жигляевский А. А.** Главные компоненты временных рядов: метод "Гусеница". СПб.: Пресском. 1997. 308 с.
19. **Mahmoudvand R., Rodrigues P. C., Yarmohammadi M.** Forecasting Daily Exchange Rates: A Comparison Between SSA and MSSA // *REVSTAT — Statistical Journal*. 2019. Vol. 17(4). P. 599–616.
20. **Hu H., Guo S., Liu R., Wang P.** An adaptive singular spectrum analysis method for extracting brain rhythms of electroencephalography // *PeerJ*. 2017. N. 6, e3474. doi:10.7717/peerj.3474
21. **Maddirala A. K., Shaik R. A.** Removal of EOG artifacts from single channel EEG signals using combined singular spectrum analysis and adaptive noise canceler // *IEEE Sensors Journal*. 2016. Vol. 16. P. 8279–8287. doi:10.1109/JSEN.2016.2560219.
22. **Amin S. U., Alsulaiman M., Muhammad G., Mekhtiche M. A., Hossain M. S.** Deep Learning for EEG motor imagery classification based on multi-layer CNNs feature fusion // *Future Generation computer systems*. 2019.101. P. 542–554.
23. **Onay F. K., Köse C.** Power Spectral Density Analysis in Alfa, Beta and Gamma Frequency Bands for Classification of Motor EEG Signals // In 2019 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). 2019. IEEE, P. 1–4.
22. **Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю.** Меры сходства и метрики сравнения форм мозаичных изображений // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. 2014. № 4. С. 76–89. doi:10.1134/S1064230714040169.
23. **Taha A., Hanbury A.** An Efficient Algorithm for Calculating the Exact Hausdorff Distance // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2015. Vol. 37. N. 11. P. 2153–2163.
24. **Kobler R. J., Kolesnichenko E., Sburlea A. I., Müller-Putz G. R.** Distinct cortical networks for hand movement initiation and directional processing: An EEG study // *NeuroImage*. 2020. Vol. 220. 117076.
25. **Wang K., Xu M., Wang Y., Zhang S., Chen L., Ming D.** Enhanced decoding of pre-movement EEG patterns for brain-computer interfaces // *Journal of Neural Engineering*. 2020. Vol. 17(1). 016033.
26. **Wriessnegger S. C., Müller-Putz G. R., Brunner C., Sburlea A. I.** Inter-and Intra-individual Variability in Brain Oscillations During Sports Motor Imagery // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2020. Vol. 14. 448 p.
27. **Collazos-Huertas D., Caicedo-Acosta J., Castaño-Duque G. A., Acosta-Medina C. D.** Enhanced Multiple Instance Representation Using Time-Frequency Atoms in Motor Imagery Classification // *Frontiers in Neuroscience*. 2020. Vol. 14. 155 p.
28. **Mammone N., Ieracitano C., Morabito F. C.** A deep CNN approach to decode motor preparation of upper limbs from time-frequency maps of EEG signals at source level // *Neural Networks*. 2020. Vol. 124. P. 357–372.
29. **Debarnot U., Di Rienzo F., Daligault S., Schwartz S.** Motor Imagery Training During Arm Immobilization Prevents Corticomotor Idling: An EEG Resting-State Analysis // *Brain Topography*. 2020. P. 1–9.
30. **Jochumsen M., Knoche H., Kjaer T. W., Dinesen B., Kidmose P.** EEG Headset Evaluation for Detection of Single-Trial Movement Intention for Brain-Computer Interfaces // *Sensors*. 2020. Vol. 20(10).

O. G. Shcherban, Cand. Tech. Sc., Associate Professor, e-mail: shcher@mail.ru,
D. M. Lazurenko, Senior Researcher, e-mail: dmlazurenko@sfsedu.ru,
I. V. Shcherban, Dr. Tech. Sc., Professor, e-mail: shcheri@mail.ru,
N. E. Kirilenko, Jr. Researcher, e-mail: nikolai-kirilenko@mail.ru,
 Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation

The Synthesis of an Adaptive Filter for Automatic Detection and Time Localization of Premotor EEG Patterns of the Human Brain

An adaptive low-pass filter has been synthesized for automatic patterns detection of arbitrary mental movements in records of multidimensional electroencephalograms (EEG). The filter is based on the multivariate singular spectrum analysis. The effective bandwidth of the filter corresponds to the spectrum of the sought patterns of mental activity on the observed EEG time interval. The use of the synthesized filter provided a reliable automatic search for patterns and the correct determination of their time boundaries. The correctness of the results has been confirmed in experiments with 24 volunteers.

Keywords: adaptive low-pass filter, real-time searching, short-time patterns, EEG signals, multichannel singular spectrum analysis, the Hausdorff metric

DOI: 10.17587/it.27.484-493

References

1. Krasovskii A. A. ed. The Theory Of Automatic Control, Moscow, Nauka, 1987, 720 p. (In Russian).
2. Mironovskii L. A. Functional diagnosis of dynamic systems, *Avtomat. I Telemekh.*, 1980, no. 8, pp. 96–121.
3. Rangayyan R. M. Biomedical Signal Analysis: A Case-Study Approach, Wiley-IEEE Press, 2007, 440 p.
4. Abiri R., Borhani S., Sellers E. W., Jiang Y., Zhao X. A comprehensive review of EEG-based brain–computer interface paradigms, *Journal of neural engineering*, 2019, no. 16(1), 011001.
5. Shcherban I. V., Kirilenko N. E., Krasnikov S. O. A Search Method for Unknown High-Frequency Oscillators in Noisy Signals Based on the Continuous Wavelet Transform, *Autom. Remote Control.*, 2019, no. 80, no. 7, pp. 1279–1287.
6. Jusas V., Samuvel S. G. Classification of motor imagery using combination of feature extraction and reduction methods for brain-computer interface, *Information Technology and Control*, 2019, no. 48(2), pp. 225–234.
7. Shcherban I. V., Kirilenko N. E., Shcherban O. G. Effective cost functions for spectrum entropy to search for high-frequency event-related patterns in electrograms with noise, *Informatsionno-Upravliaiushchie Sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2018, no. 2, pp. 8–17 (In Russian).
8. Lee W. H., Kim E., Seo H. G., Oh B. M., Nam H. S., Kim Y. J., Bang M. S. Target-oriented motor imagery for grasping action: different characteristics of brain activation between kinesthetic and visual imagery, *Scientific reports*, 2019, no. 9(1), pp. 1–14.
9. Chen C., Zhang J., Belkacem A. N., Zhang S., Xu R., Hao B., Ming D. G-causality brain connectivity differences of finger movements between motor execution and motor imagery, *Journal of healthcare engineering*, 2019, pp. 1–12.
10. Lazurenko D. M., Kiroy V. N., Aslanyan E. V., Shepelev I. E., Bakhtin O. M., Minyaeva N. R. Electrographic Properties of Movement-Related Potentials, *Neuroscience and Behavioral Physiology*, 2018, no. 48(9), pp. 1078–1087.
11. Sengupta A. Study of Cognitive Fatigue using EEG Entropy Analysis, In *2020 International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET)*, 2020, IEEE, pp. 1–6.
12. Zapala D., Zabielska-Mendyk E., Augustynowicz P., Cudo A., Jaśkiewicz M., Szewczyk M., Francuz P. The effects of handedness on sensorimotor rhythm desynchronization and motor-imagery BCI control, *Scientific reports*, 2020, no. 10, pp. 1–11.
13. Kilicarslan A., Vidal J. L. C. Characterization and real-time removal of motion artifacts from EEG signals, *Journal of Neural Engineering*, 2019, no. 16(5), 056027.
14. Correa A. G., Orosco L. L., Diez P., Leber E. L. Adaptive filtering for epileptic event detection in the EEG, *Journal of Medical and Biological Engineering*, 2019, no. 39(6), pp. 912–918.
15. Shcherban O. G., Shcherban I. V., Lobzenko P. V. The Real-Time Method for the Temporal Localization of the High-Frequency Patterns in Noised Multichannel Signals, *Informacionnye tehnologii* [Information Technology], 2020, no. 9, pp. 507–514 (In Russian).
16. Smolencev N. K. Osnovy teorii veyvletov. Veyvlety v MATLAB [Fundamentals of the theory of wavelets. Wavelets in MATLAB], Moscow, DMK Publ., 2005. 305 p. (In Russian).
17. Rodrigues P. C., Mahmoudvand R. The benefits of multivariate singular spectrum analysis over the univariate version, *Journal of the Franklin Institute*, 2018, no. 355(1), pp. 544–564.
18. Danilov D. L., ZHiglyavskij A. A. Principal components of time series structure: SSA, St. Petersburg, *Presskom Publ.*, 1997, 308 p. (In Russian).
19. Mahmoudvand R., Rodrigues P. C., Yarmohammadi M. Forecasting Daily Exchange Rates: A Comparison Between SSA and MSSA, *REVSTAT — Statistical Journal*, 2019, no. 17(4), pp. 599–616.
20. Hu H., Guo S., Liu R., Wang P. An adaptive singular spectrum analysis method for extracting brain rhythms of electroencephalography, *PeerJ*, 2017, no. 6, e3474.
21. Maddirala A. K., Shaik R. A. Removal of EOG artifacts from single channel EEG signals using combined singular spectrum analysis and adaptive noise canceler, *IEEE Sensors Journal*, 2016, no. 16, pp. 8279–8287.
22. Amin S. U., Alsulaiman M., Muhammad G., Mekhtiche M. A., Hossain M. S. Deep Learning for EEG motor imagery classification based on multi-layer CNNs feature fusion, *Future Generation computer systems*, 2019, no. 101, pp. 542–554.
23. Onay F. K., Köse C. Power Spectral Density Analysis in Alfa, Beta and Gamma Frequency Bands for Classification of Motor EEG Signals, In *2019 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2019, IEEE, pp. 1–4.
22. Vizilter Yu. V., Zheltov S. Yu. Similarity measures and comparison metrics for image shapes, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2014, no. 53, no. 4, pp. 542–555.
23. Taha A., Hanbury A. An Efficient Algorithm for Calculating the Exact Hausdorff Distance, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, no. 37, no. 11, pp. 2153–2163.
24. Kobler R. J., Kolesnichenko E., Sburlea A. I., Müller-Putz G. R. Distinct cortical networks for hand movement initiation and directional processing: An EEG study, *NeuroImage*, 2020, no. 220, 117076.
25. Wang K., Xu M., Wang Y., Zhang S., Chen L., Ming D. Enhance decoding of pre-movement EEG patterns for brain–computer interfaces, *Journal of Neural Engineering*, 2020, no. 17(1), 016033.
26. Wriessnegger S. C., Müller-Putz G. R., Brunner C., Sburlea A. I. Inter- and Intra-individual Variability in Brain Oscillations During Sports Motor Imagery, *Frontiers in Human Neuroscience*, 2020, no. 14, 448 p.
27. Collazos-Huertas D., Caicedo-Acosta J., Castaño-Duque G. A., Acosta-Medina C. D. Enhanced Multiple Instance Representation Using Time-Frequency Atoms in Motor Imagery Classification, *Frontiers in Neuroscience*, 2020, no. 14, 155 p.
28. Mammone N., Ieracitano C., Morabito, F. C. A deep CNN approach to decode motor preparation of upper limbs from time–frequency maps of EEG signals at source level, *Neural Networks*, 2020, no. 124, pp. 357–372.
29. Debarnot U., Di Rienzo F., Daligault S., Schwartz S. Motor Imagery Training During Arm Immobilization Prevents Corticomotor Idling: An EEG Resting-State Analysis, *Brain Topography*, 2020, pp. 1–9.
30. Jochumsen M., Knoche H., Kjaer T. W., Dinesen B., Kidmose P. EEG Headset Evaluation for Detection of Single-Trial Movement Intention for Brain-Computer Interfaces, *Sensors*, 2020, no. 20(10).

А. В. Вишнеков, д-р техн. наук, проф., e-mail: avishnekov@hse.ru,

Е. А. Ерохина, ст. преподаватель, e-mail: eerokhina@hse.ru,

Е. М. Иванова, канд. техн. наук, доц., ДКИ НИУ ВШЭ, e-mail: emivanova@hse.ru,
ДКИ НИУ "Высшая школа экономики", Москва

Опыт применения цифровых технологий при переходе базового университетского образования на онлайн-формат обучения

Рассмотрены вопросы использования цифровых сервисов в учебном процессе университета в условиях комплексного перевода базового образования в онлайн-формат. Выполнен обзор образовательных онлайн-технологий. Рассмотрены достоинства и недостатки общедоступных и корпоративных цифровых сервисов. На основе результатов опроса студентов выявлены особенности взаимодействия преподавателей и учащихся. Предложены различные формы проведения онлайн-занятий в условиях ограниченности ресурсов.

Ключевые слова: онлайн-обучение, цифровые образовательные технологии, формы онлайн-преподавания

Введение

В 2019/20 и 2020/21 учебных годах учебные заведения столкнулись с необходимостью кардинально перестраивать свою образовательную деятельность, уменьшая (или совсем ликвидируя) очные занятия в классах/аудиториях и увеличивая онлайн-активность преподавателей/учебных менеджеров/студентов. В ведущих российских университетах (в том числе в НИУ ВШЭ [1]) уже был накоплен опыт преподавания в формате e-learning и blended learning [2–4] — образовательного процесса, частично перенесенного в онлайн-пространство и цифровую среду. Это позволяет экономить время и средства, а также дает возможность использовать выделенные аудиторные часы для обсуждения и закрепления материала, изученного с применением цифровых технологий.

Образовательные учреждения вынуждены были в экстренном порядке осваивать и развивать Интернет-ресурсы, применять технологии видеоконференций и коллективной работы в сети. В такой ситуации возникает целый ряд вопросов, связанных с выбором той или иной онлайн-технологии проведения занятий, анализом их достоинств и недостатков, их сравнением. Особенно актуальна эта задача в условиях ограничения сетевого трафика или наличия перебоев со связью.

В данном исследовании рассматриваются и анализируются особенности доступных Интернет-технологий, а также предлагаются варианты решения проблем организации онлайн-занятий, в том числе в условиях ограниченности Интернет-трафика, на основе опыта, полученного в ходе перевода на on-line формат обучения в 2020 г. студентов направления Информатика и вычислительная техника МИЭМ им. А. Н. Тихонова НИУ ВШЭ.

Обзор образовательных онлайн-технологий для проведения занятий

Процесс цифровизации образования уже имеет свою историю. Многие исследователи и преподаватели анализировали возможности онлайн-обучения [5], встраивания онлайн-ресурсов в образовательную траекторию [6, 7]. В последние два учебных года в связи с пандемией COVID-19 и необходимостью соблюдения карантинных мер потребовался быстрый комплексный перевод базового университетского образования в онлайн-формат. За это время было выполнено множество обзоров доступных ресурсов, а также исследований в области онлайн-технологий, e-learning и blended learning. В ряде работ по педагогике за основу классификации образовательных технологий,

в том числе онлайн, взяты четыре типа импульсов/инстинктов ученика [8] и рассматриваются цифровые инструменты с точки зрения этих категорий: инструменты для исследования; инструменты для самостоятельного сбора информации; инструменты для анализа информации; инструменты для коммуникации. В других исследованиях за основу классификации ресурсов взята таксономия Блума [9, 10] и ее цифровые аналоги [11, 12], где исследователи рекомендуют следующие типы цифровых инструментов для формирования знаний различных когнитивных уровней сложности:

- *инструменты для запоминания* (Notepad+, Word, PowerPoint, Excel, AdobeReader, ThingLink, GoogleDocs, GoogleClassroom и др.);
- *инструменты для понимания* (онлайн-переводчики, чаты, форумы, ресурсы для самообразования: Coursera, Wikipedia и др.);
- *инструменты для применения теоретических знаний* (онлайн-калькуляторы, диаграммы, системы онлайн-тестирования, программное обеспечение (ПО) для математических/физических и др. экспериментов, компьютерные онлайн-симуляторы);
- *инструменты для анализа* (онлайн-обзоры, диаграммы, рефераты, инструменты для создания опросников/построения графиков);
- *инструменты для оценки* (специализированное программное обеспечение (СПО) для командной или групповой работы, интерактивные онлайн-доски, многопользовательские редакторы, цифровые среды, форумы, wiki, онлайн-поддержка учебного процесса (LMS), видеоконференции, вебинары);
- *инструменты для создания/творчества* (программы для творчества: рисования, создания музыки, анимации и мультимедийных проектов, СПО для профессиональной деятельности (программирования, компиляции, редактирования программного кода, отладки, моделирования, конструирования, проектирования)).

Проведем анализ особенностей цифровых инструментов, наиболее активно используемых в учебном процессе.

Общедоступные сервисы

Zoom [13] — платформа для проведения видеоконференций, онлайн-встреч. Достоинства: кроссплатформенность, устойчивая связь, удобный интерфейс, расширенные возможности записи и хранения, демонстрации,

комментирования, индивидуальных настроек, работы в группах, опросов и др. Недостатки: требует установки и входной настройки, бесплатная учетная запись позволяет проводить видеоконференцию длительностью 40 мин для 100 участников и менее, для возможности использования расширенных опций необходимо приобретение лицензии.

Jitsi [14] — бесплатная минималистическая платформа для проведения онлайн-конференций. Достоинства: простота использования/запуска (переход по адресу в строке браузера), не требует установки и дополнительных настроек, поддерживает: демонстрацию экрана, запись встречи, авторизацию, чат. Возможен одновременный просмотр экранов нескольких участников. Недостатки: минимальный набор опций, чувствителен к увеличению числа участников (нарушение связи, замедление). Устойчиво работает только с последними версиями браузеров Opera и Google.

Webinar [15] — платформа для онлайн-мероприятий. Достоинства: работает на всех браузерах, удобный интерфейс, несколько тысяч участников, поддержка одновременно до 8 спикеров, расширенные возможности опросов (моментальный анализ статистики поведения слушателей), обмен файлами и папками, интерактивность, возможность записи мероприятий. Недостатки: бесплатный тариф на 5 участников, требует обучения, согласно отзывам [16] имеются частые сбои в подключении, недоработанность сервиса, дорогостоящее приобретение лицензии, поддерживаемые расширенные опции.

Msteams [17] — программа для конференц-связи и удаленного обучения, входящая в программный пакет Office 365. Достоинства: расширенные возможности совместной работы, подключения до 10 000 слушателей, широкой интеграции приложений, видеоканалов, обмена файлами и папками, доступа к облачному хранилищу объемом 1 ТБ, настройки уведомлений внутри платформы или по почте. Недостатки: сложный интерфейс, требует установки, регистрации (учетная запись Microsoft) и обучения, по отзывам пользователей [18] платформа работает неровно. Бывают случаи некорректной загрузки файлов, не работает с файлами форматов doc, xls, ppt (только docx, xlsx, pptx соответственно), для возможности использования расширенных опций по защите и восстановлению данных необходимо приобретение лицензии.

Google Documents [19] — сервис для редактирования и оформления основных видов документов. Достоинства: бесплатный сервис, уда-

ленный доступ и облачное хранение для многих пользователей, удобная совместная работа (онлайн и офлайн) с общими данными, полная бесплатность, доступ из любой точки мира. Недостатки: интерфейс, отличный от привычного MsOffice (иногда требуются дополнительные настройки), при переносе данных из/в привычные файлы MsOffice форматирование может нарушиться, а доступ к некоторым блокам пропадает.

Google Classroom [20] — упрощенная LMS-система поддержки обучения с простым интерфейсом. Достоинства: поддержка минимального необходимого набора опций, имеет возможности расширения за счет дополнительных программных вставок. Недостатки: минималистичность, требует регистрации, ограниченные возможности тестирования, оценивания, сложный многостраничный справочный форум по использованию.

Цифровые сервисы, применяемые при онлайн-обучении в НИУ ВШЭ [21]

LMS HSE [22] — корпоративная информационная образовательная среда (на базе eFront [23]) — система онлайн-поддержки учебного процесса в университете (НИУ ВШЭ). Достоинства: интуитивно понятный интерфейс, интегрированность дисциплин учебного плана, пользователей, поддержка необходимого набора опций, стабильная работа программной оболочки, подробные отчеты о деятельности пользователей с гибкой фильтрацией. Недостатки: корпоративность, требует обучения, небольшое число инструментов для создания учебных материалов, малое сообщество пользователей eFront.

Smart LMS [24] — информационная образовательная среда (на базе наиболее популярной в мире платформы Moodle [25, 26] с открытой архитектурой). Достоинства: поддержка современных инструментов и форматов онлайн-обучения, адаптированность для мобильных устройств, возможность встраивания разнообразных инструментов: тренажеров, симуляторов, прокторинга и др., интеграция дисциплин учебного плана и учет особенностей распределения нагрузки, расширенная поддержка опций (например, тестирования), наличие подробной документации и множества учебных пособий. Недостатки: корпоративность (настраивается для университета), повышенная трудоемкость для освоения, сложный интерфейс, требователен к серверу, требует многочасовой практики и углубленного изучения.

Цифровые сервисы факультета МИЭМ им. А. Н. Тихонова НИУ ВШЭ [27]

Личный кабинет проекта — предназначен для ведения отчетности и сбора статистики по совместной работе преподавателей и студентов в рамках проектной деятельности. Достоинства: единое пространство работы, формализация требований. Недостатки: только для одного университета, находится в процессе доработки.

Решebник/конструктор заданий по дисциплинам на базе микросервисной архитектуры ПО позволяет создавать общие шаблоны заданий, генерировать новые задачи по шаблону, а также автоматически проверять ответы студентов. Достоинства: ускорение проверки заданий и получения оценки потоком студентов за счет автоматизация ручного труда преподавателей. Недостатки: разработаны только единичные реализации сервиса для отдельных дисциплин.

Чат Zulip (МИЭМ) — корпоративный централизованно поддерживаемый ресурс на базе ПО для совместной работы [28], в который с помощью чат-ботов интегрируются различные сервисы МИЭМ, чат по интересам/курсам/проектам/дисциплинам и т. д. Достоинства: доступность даже при низкой скорости интернета. Недостатки: дублирование сервиса в дополнение к существующим возможностям видеочатов/LMS.

Репозиторий Gitlab (с привязкой репозиторий по проектам) — удобная и современная система управления репозиториями кода, версионного контроля программных разработок и отслеживания ошибок с открытым исходным кодом [29]. Достоинства: возможность хранения и анализа текущих версий документации и программного обеспечения проекта. Недостатки: цифровой след жестко связан со студенческим аккаунтом МИЭМ.

Сервис трекинга проектов на базе трекера Trello [30]. Достоинства: автоматический учет выполненных этапов работы и сбор отчетности с помощью чат-бота. Недостатки: специализация только для одного университета, находится в процессе доработки.

Особенности взаимодействия преподавателей и студентов

Преподаватели используют различные онлайн-технологии [13–30] для организации "аудиторных" занятий (лекция, семинар, лабораторная работа, консультации). Следует

учесть, что преподаватели и студенты могут находиться при проведении онлайн-занятий в различных условиях. Для выяснения этих особенностей в 2019/2020 г. среди студентов был проведен опрос (рис. 1–3). Анализ результатов опроса позволил оценить возможности учащихся и их предпочтения относительно форм онлайн-активности.

Так, например, выяснилось, что не у всех студентов имеется возможность работать онлайн синхронно в режиме реального времени (см. рис. 1), и в этом случае необходимо применять другие формы взаимодействия с аудиторией. В качестве таких форм рассматривались (см. рис. 2): скачивание презентаций с голосовыми или текстовыми комментариями (предпочтителен второй вариант) из облачного хранилища;

аудио- или видеоматериалы лекций и семинаров, выложенные в облаке (студенты отдавали предпочтение последнему).

Для консультации по непонятным моментам в теоретическом материале или при выполнении практических заданий студенты предпочли общению в видеоконференциях обмен сообщениями в чате (первое место по популярности) или по почте (второе место) по аналогии с привычными мессенджерами (рис. 3).

Формы проведения занятий и их сравнительный анализ

Часто преподаватели при переходе в онлайн-формат используют метод обучения,

Возможен ли доступ в Интернет там, где вы сейчас находитесь?

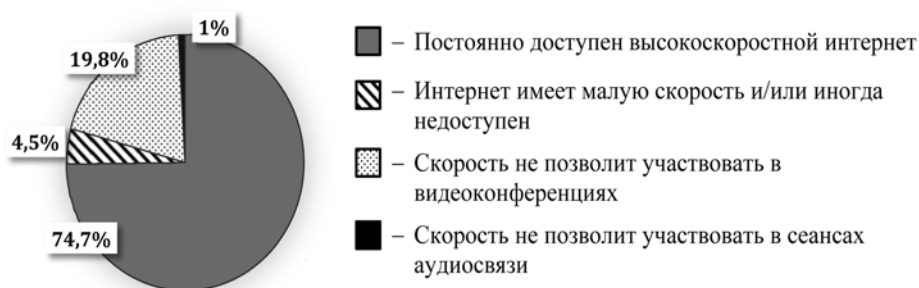


Рис. 1. Результаты опроса студентов о скорости / доступности Интернета

Какой формат материалов курса вам удобнее?

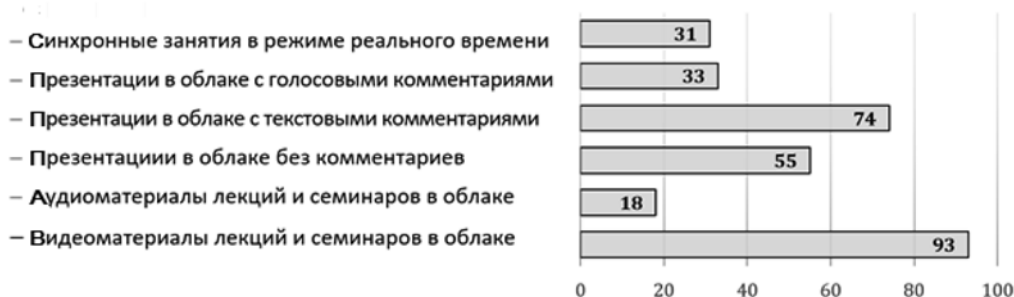


Рис. 2. Предпочтения студентов: способ получения материалов курса

В каком виде нужно организовать обратную связь?

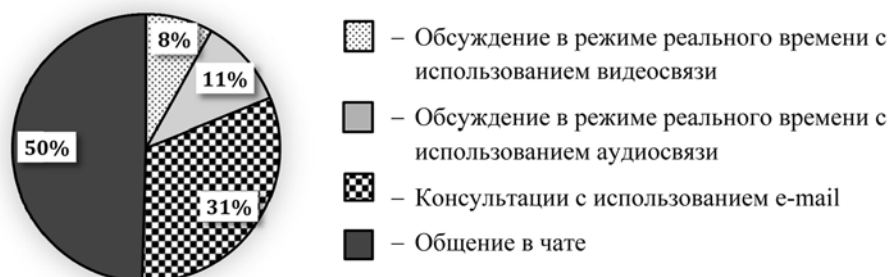


Рис. 3. Предпочтения студентов: форма взаимодействия с преподавателем

полностью соответствующий очным занятиям в аудиториях: синхронное проведение лекционных, семинарских и практических занятий в режиме видеоконференции с возможностью выступления в качестве докладчика как для преподавателя, так и для любого учащегося. Однако, как показали результаты опроса студентов (рис. 1–3), этот вид обучения не самый удобный, не самый эффективный, не самый приемлемый с точки зрения учащихся. Особенно тяжело воспринимается студентами непрерывная лекция на два академических часа (что является нормой для российских высших учебных заведений и никак не изменилось при онлайн-обучении в период вынужденных карантинных мер). И здесь уже сами преподаватели вынуждены изобретать такую структуру онлайн-занятия, которая минимизирует влияние скоростных характеристик сети, сглаживает неудобства пребывания один на один с новым предметом и обеспечивает максимальную пользу от каждого занятия.

Групповая работа в чате с заранее озвученными и выложенными в облако презентациями. В отсутствие возможности у преподавателей доступа к лицензионной версии Zoom [13], а также при использовании Jitsi [14] проведение лекций для аудитории численностью более 50 человек сопряжено с большими трудностями: замедление, перерывы, периодическое отключение участников. Поэтому занятия в бакалавриате с потоком в 160 человек вынужденно проводились с использованием общения в чате. Для этого до начала проведения лекции на Google-диск [31] выкладывались презентации лекций.

Презентация была разделена на фрагменты, которые сопровождалась голосовыми пояснениями (можно реализовать средствами PowerPoint). Таким образом, студенты имели возможность предварительного ознакомления с материалом лекции, не тратя слишком много интернет-трафика на эту работу.

В момент начала проведения лекции все студенты и преподаватель выходили в чат. Затем студентам давалось время на ознакомление с первым, а затем и последующими фрагментами материала. В процессе ознакомления у студентов была возможность задать вопросы преподавателю, в том числе студенты могли отвечать на вопросы своих соучеников, что оценивалось баллами за работу на лекции. После этого преподаватель проводил опрос по материалам фрагмента, оценивая несколько первых правильных ответов на каждый вопрос. Затем давался правильный ответ на вопрос и необходимые допол-

нительные пояснения. В конце занятия могла проводиться проверочная работа в форме теста либо решения небольшой задачи. Решения высылались для проверки на почту преподавателя.

Очень полезным результатом такой формы проведения занятия является наличие "протокола" его проведения (копия сообщений из чата). При этом можно легко восстановить ход занятия подробно, а также удобно оценивать результаты учеников. Это снимает вопросы о том, какая оценка и за что выставлена.

Таким образом, удалось разработать технологию, включающую *разбиение лекции на тематические разделы и смену вида деятельности обучаемого* после каждого такого раздела. Примером такой смены может служить небольшой тест, совместное решение простой задачи в игровой форме (см. ниже), обсуждение изложенного материала со студентами.

В условиях наличия лицензионной версии Zoom лекции проводятся в форме конференции. При этом особое внимание следует уделить обратной связи со студентами. Лектор должен не просто излагать материал, а максимально привлекать студентов к его обсуждению. Также удачной идеей является *использование заранее заготовленных динамических графических иллюстраций* (например, для демонстрации исполнения алгоритмов). Для этого можно использовать формат gif, встроенную анимацию PowerPoint, небольшие авторские приложения. После проведения занятий необходимо выложить материалы лекций и семинаров в форме презентации, а также запись проведения занятий в видеоформате. Важно наличие обеих форм, презентация позволяет быстро найти нужный материал, а видеозапись помогает вспомнить подробности изложения материала.

Предварительная публикация формализованных критериев проверки работ (контрольных, домашних, лабораторных и др.). Эти критерии должны быть доведены до всех студентов в начале обучения и неукоснительно соблюдаться всеми преподавателями, ведущими дисциплину. При этом критерии оценивания работ едины как для очной формы проведения занятий, так и для онлайн-обучения. Пример таких критериев для выполнения лабораторных работ по дисциплине "Алгоритмизация и программирование" показан в таблице (в НИУ ВШЭ принята 10-балльная система оценок [32]).

Порядок распределения заданий и приема работ должен быть также заранее продуман и доведен до сведения студентов. В условиях онлайн-формы обучения удобно выдавать за-

Критерии оценивания лабораторных работ

Раздел	Максимальная оценка	Полученная оценка
Постановка задачи	0,5	Например, 0,3
Метод решения	1	
Внешняя спецификация	0,5	
Алгоритм	1,5	
Работа программы	1	
Листинг программы	0,5	
Тесты	1	
Ответы на вопросы	2	
Дополнительное задание	2	
Суммарная оценка	10	Округляется до ближайшего целого

дания заранее, размещая варианты¹ и методические пособия на общедоступных ресурсах (Google Classroom, LMS, общие папки MsTeam и др.) и позволив студентам выполнять работы в удобное для них время. Защиту работ следует проводить в онлайн-режиме для оценки самостоятельности выполнения, причем установить строгое ограничение по времени и соответствие регламенту защиты.

Регламент сдачи лабораторных работ должен обеспечивать *равномерность распределения в течение модуля/семестра*, для чего введено понятие *дедлайна*². Дедлайны помогают студентам более правильно распределить свое время на выполнение заданий. На выполнение каждой работы отводится определенное число недель/занятий, а за опоздание оценка снижается тем больше, чем больше опоздание (сначала на 60 %, затем на 40 %), и после истечения определенного срока работа не оценивается.

Регламент дистанционного проведения контрольных и проверочных работ предполагает жесткие временные рамки для отправки решений и четкое следование правилам оформления ответа для сдающих, а также строгое соблюдение критериев оценивания для проверя-

ющих. При несоблюдении требований оценка снижается.

Выявление плагиата³ в работах в режиме онлайн имеет свои особенности. В условиях онлайн-проведения проверочной работы необходимо либо обеспечить *большое число разнообразных заданий*, либо немного изменить формулировку задачи для разных групп во избежание неконтролируемого преподавателем обмена решениями по сети. Идеальным вариантом является разработка различных вариантов по числу студентов, а затем распределение номеров в группах так, чтобы студенты с одинаковым номером по списку в разных группах имели разные задания. Если это невозможно, рекомендуется дать одинаковым вариантам разные номера в различных группах.

Еще один допустимый прием — вообще не сообщать студенту номер варианта, а вместо этого дать ссылку на условие задания и адрес почты, куда следует выслать решение. Ссылки на облачное хранилище готовятся преподавателем заранее и распределяются случайным образом среди студентов. Так как ссылки генерируются облачными ресурсами и состоят из большого числа различных символов, то их трудно сопоставить.

Механизм автоматизированного оценивания выполненных лабораторных работ в условиях онлайн. При приеме результатов самостоятельно выполненных студентами работ возникает очередь, которая особенно тяжело принимается студентами в онлайн-пространстве (ты работаешь один, без общения и помощи). Кроме того, в потоке всегда находятся наиболее активные и мотивированные студенты, которые оказываются первыми в таких очередях. Для повышения самооценки всех остальных студентов и их удовлетворенности от процесса обучения мы предложили в качестве защиты вместо устной беседы с преподавателем пройти онлайн-тестирование, которое может быть пройдено студентом в любое удобное время. Тогда в освободившееся время студенты смогут больше общаться с преподавателем, консультироваться по поводу деталей выполнения лабораторных работ. В качестве таких тестовых систем могут использоваться любые общедоступные бесплатные (Googleforms [19], Kahoot [33]) или лицензионные (Socrative [34]) сервисы. Мы использовали

¹Номера вариантов уникальны для всех потоков студентов, изучающих дисциплину параллельно, и не меняются в течение учебного года.

²Жестко заданные сроки сдачи каждого вида работ, которые могут быть изменены индивидуально в случае, если студент пропустил занятие по уважительной причине при наличии справки (но не дальше окончания модуля/семестра).

³По правилам НИУ ВШЭ [29] заимствованная работа оценивается нулевым баллом (в случае если это курсовая или выпускная квалификационная работа возможно даже отчисление студента).

В каком виде нужно организовать обратную связь?

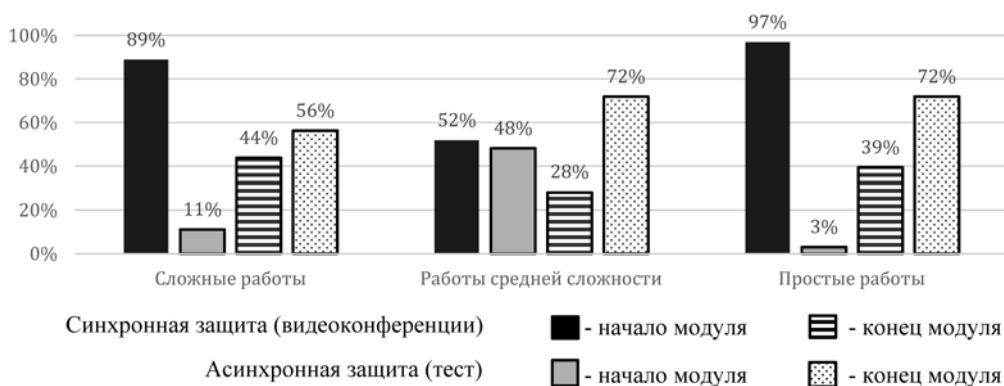


Рис. 4. Диаграмма результатов предпочтений студентов среди форм оценивания

подобный функционал, который встроен в LMS [22]/SMART LMS[24]. Но при этом также осталась возможность для получения оценки после устного ответа преподавателю, что позволило студенту самостоятельно выбирать форму оценивания. В результате выяснилось, что студенты в начале обучения предпочитали синхронное общение с преподавателем, а к концу изучения дисциплины чаще стали прибегать к асинхронному автоматизированному тестированию (рис. 4). Разнообразие форм оценивания позволит учесть различные предпочтения студентов и их стили обучения [35, 36], что также, в свою очередь, повысит удовлетворенность студентов, их мотивацию и успеваемость в целом.

Кооперация студентов в условиях онлайн.

Совместное выполнение какой-либо работы дает возможность большего взаимодействия в онлайн-пространстве, снижает чувство изолированности от коллектива. Поэтому желательно для повышения мотивации и удовлетворенности студентов от процесса онлайн-обучения

заранее предусмотреть несколько подобных занятий. Например, вместо индивидуального задания на лабораторную/практическую домашнюю работу объединять студентов (по желанию) в небольшие бригады (по 2...3 человека). Другим способом кооперации является совместная работа на тематических форумах, где студенты задают вопросы и, иногда не дожидаясь ответа преподавателя, сами ищут решение, обсуждая и оценивая различные подходы. Еще одним примером совместной работы может служить небольшое задание на лекции/семинаре для закрепления материала (например, построение единой схемы из отдельных элементов на интерактивной онлайн-доске или на совместное решение задачи): доска Microsoft или совместное редактирование документов в Google Docs/MsTeams (рис. 5), доска Miro, совместное комментирование или разрешение на удаленное управление файлом в Zoom и др.

Использование элементов геймификации в процессе обучения/оценивания.

Любые игровые элементы безусловно вносят разнообразие в процесс обучения и делают курс более привлекательным для студентов. Можно привести пример формирующего оценивания с применением онлайн-сервиса Socrative [34] для проведения тестирования на занятиях в учебных заведениях. Проходя процедуру формирующего оценивания, студенты не боятся получить плохую оценку (так как оценки не выставляются в журнал дисциплины), но тем не менее, в нем присутствуют все присущие тесту элементы обучения. При попытке отве-

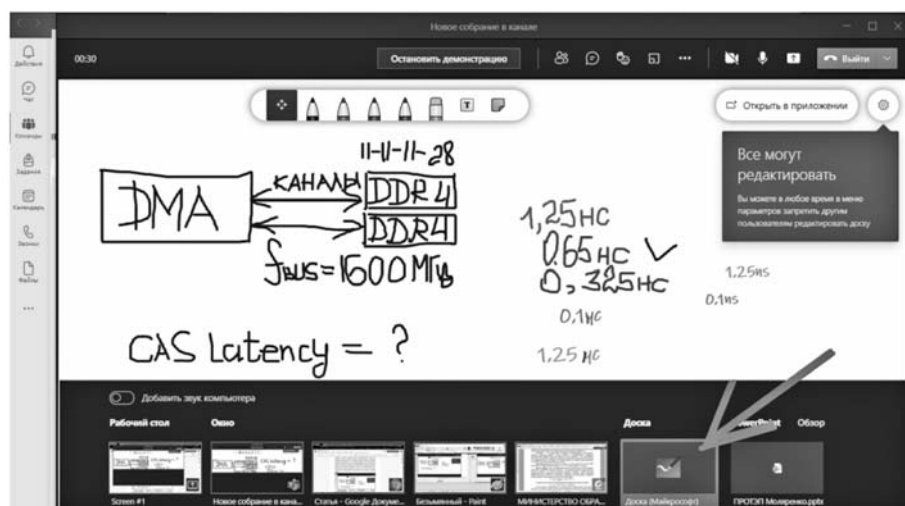


Рис. 5. Пример совместного решения задачи на доске в Ms Teams

тить на вопросы теста студент невольно повторяет материал. Система не требует установки ПО и не требует регистрации, только ввод любого никнейма (для преподавателей требуется регистрация, но она бесплатна, хотя есть и платная версия позволяющая воспользоваться расширенным функционалом сбора и анализа статистики, а также рассылки результатов слушателям). С помощью системы Socrative также можно добавить соревновательный момент, разделив аудиторию на команды (Quiz Space Race, рис. 6) и заставив их соревноваться в числе правильных ответов.

Тест можно запустить в любом месте лекции, при этом процесс обучения не прерывается. Тест обеспечивает преподавателю обратную связь, которая поможет ему оценить, какие материалы раздела наиболее трудны для понимания. Студенты тоже получают немедленную обратную связь после тестирования и имеют возможность обсудить с преподавателем свои ошибки.

Другим примером геймификации процесса обучения может служить вариант сообщения студентам формулы выставления накопленной оценки [32] по дисциплине в виде загадки "Попробуйте угадать". Это позволит услышать пожелания студентов и их приоритеты, а также заставит лучше запомнить элементы контроля и саму формулу. Критерии оценки различных видов работ при переходе в онлайн-формат могут оставаться прежними, меняется только способ проведения занятий и технология оценивания.

*Привлечение учебных ассистентов*⁴ для взаимодействия с большим числом студентов. Учебным ассистентам можно поручить онлайн-сопровождение лабораторных работ, удаленную проверку письменных работ, ведение журнала, работу с презентациями. При нестабильной работе интернета у студентов, либо перегрузке каналов связи из-за большого числа подключений ассистенты могут принимать работы по почте или в отдельном канале. Это актуально, если студент находится в другом часовом по-

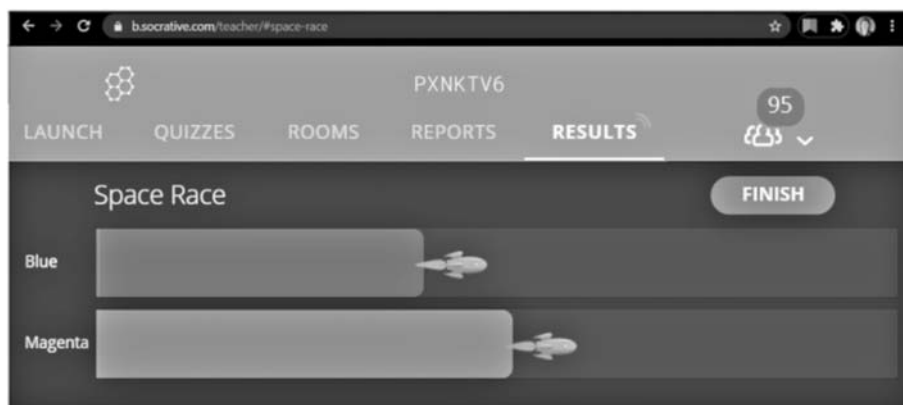


Рис. 6. Скриншот с сайта Socrative

ясе или, например, если в связи с карантином студент не смог приехать в кампус.

Кроме того, ассистенты могут проверять работы студентов, но при этом важно строгое соблюдение единых критериев проверки. Следует отметить, что ответственность за правильность проверки работ лежит на преподавателе, и студенты всегда могут обратиться к нему за пояснениями и за апелляцией, если они не согласны с оценкой.

При реализации дисциплин в больших потоках студентов к преподаванию привлекаются несколько преподавателей и ассистентов, которые работают параллельно и ведут свои ведомости/журналы. При этом общий журнал должен заполняться непрерывно и оперативно. Для того чтобы студент мог ознакомиться с замечаниями по своей работе и напрямую обратиться с вопросами к тому, кто проверял эту работу, удобно создавать *сводные таблицы результатов проверки с общим доступом* (например, Google Docs). При этом преподаватели и учебные ассистенты имеют права редактирования, а студенты могут только просматривать таблицу.

Оперативное ведение журнала успеваемости и достоверность данных в условиях онлайн-обучения можно обеспечить за счет автоматизации расчета оценок с использованием Microsoft Excel. Данное ПО позволяет запрограммировать не только вычисление оценки по формуле, но и пересчет оценок с учетом автоматизированного распределения дат дедлайнов в соответствии с расписанием занятий [37]. Журнал выкладывается в облако и периодически обновляется лектором, при этом данные доступны только для просмотра. Журнал успеваемости ведут учебные ассистенты, причем эту работу должны выполнять постоянно одни и те же ассистенты. Они собирают сведения об оценках, а также проверяют правильность списков студентов и дат прове-

⁴Учебные ассистенты — это студенты-старшекурсники, которые уже изучили данный курс, учатся на хорошо и отлично и согласны поработать помощниками преподавателя.

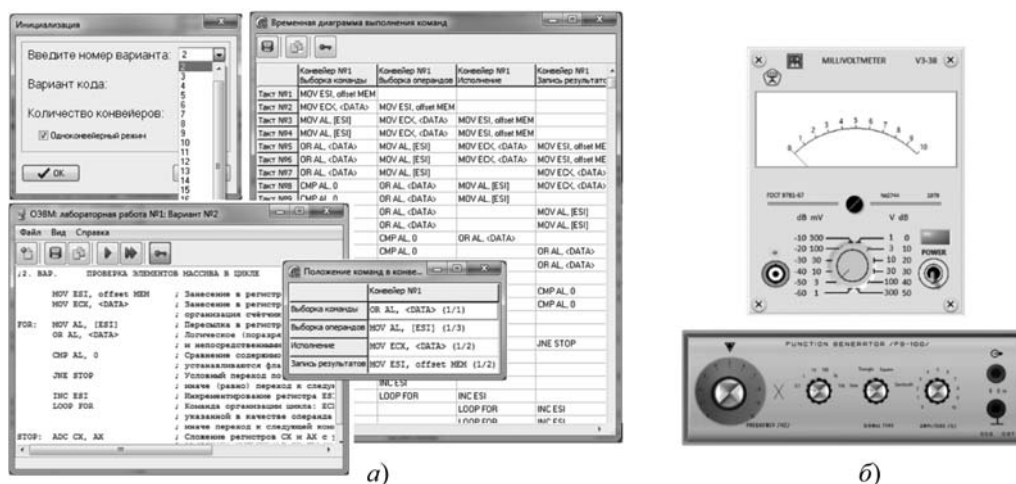


Рис. 7. Интерфейс обучающего ПО:

а — симулятор конвейера CPU; б — виртуальный лабораторный стенд

дения занятий, в случае изменения расписания оперативно вносят исправления. К журналу не должно быть общего доступа для редактирования оценок. Опыт показывает, что при наличии общего доступа почти невозможно оперативно проконтролировать полноту и правильность выставления оценок.

Удаленное выполнение лабораторных работ с помощью различных программных средств: симуляторов (рис. 7, а), виртуальных лабораторных стендов (рис. 7, б). Скачанное и установленное ПО или web-интерфейс позволяет визуально имитировать работу отдельных устройств, блоков, реальных приборов/стендов, моделировать процессы и технологии без необходимости очного присутствия в лабораториях. Студенты приобретают опыт по настройке и использованию оборудования или СПО в режиме онлайн-занятий (если позволяет Интернет-соединение) или самостоятельно, руководствуясь описанием, размещенным преподавателем в LMS-системах/облачных хранилищах [38, 39].

Заключение

В статье выполнен обзор и сравнительный анализ актуальных образовательных онлайн-технологий для базового университетского образования. Предложены разнообразные способы онлайн-взаимодействия с учащимися на основе общедоступных цифровых сервисов. На основе анализа особенностей взаимодействия преподавателей и студентов предложены хорошо зарекомендовавшие себя на практике формы проведения занятий. Для эффективного

использования цифровых сервисов и выбора педагогических приемов онлайн-преподавания необходимо учесть особенности взаимодействия преподавателей со студентами, в частности: формы контроля и оценивания результатов обучения, виды занятий (синхронный/асинхронный), размеры учебных групп, предпочтения и технические возможности оборудования студентов (доступность и скоростные характеристики Интернета). Предложенные в статье методики могут найти свое применение в различных учебных заведениях не только в период вынужденного перехода на всеобщее онлайн-обучение, но и для создания и развития образовательных онлайн-траекторий в сегменте базового образования.

Список литературы

1. Сайт Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики". [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hse.ru/> (дата обращения: 19.03.2021).
2. Association of e-Learning specialists. URL: <http://www.elearningnc.gov> (дата обращения: 19.03.2021).
3. Lapitan L. D., Tiangco C. E., Sumalinog D. A. G., Saborillo N. S., Diaz J. M. An effective blended online teaching and learning strategy during the COVID-19 pandemic // Education for Chemical Engineers. 2021. Vol. 35. P. 116–131.
4. Waha B., Davis K. University students' perspective on blended learning // Journal of Higher Education Policy and Management. 2014. Vol. 36, N. 2. P. 172–182.
5. Авдошин С. М., Чернов А. В., Песоцкая Е. Ю. Сервис цифрового контента для удаленного обучения // Информационные технологии. 2020. Т. 26, № 9. С. 529–537. DOI: 10.17587/it.26.529-537.
6. Алдунин Д. А., Федин Г. Г. Математическая модель для построения оптимальной индивидуальной образовательной траектории обучающегося при изучении массовых открытых онлайн-курсов // Информационные технологии. 2019. Т. 25, № 4. С. 250–256. DOI: 10.17587/it.25.250-256.

7. **Карамзина А. Г.** Современные информационные технологии в образовательном процессе технического университета // Информационные технологии. 2020. Т. 26, № 6. С. 368—376. DOI: 10.17587/it.26.368-376.
8. **История** педагогики. Джон Дьюи. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sites.google.com/site/istoriapedagogiki/dzon-dui> (дата обращения: 19.03.2021).
9. **Bloom B. S., Englehart M. D., Furst E. J., Hill W. H., Krathwohl D. R.** The Taxonomy of educational objectives. Handbook I: The Cognitive domain. 1956. New York: David McKay Co., Inc.
10. **Marzano R. T., Kendall J. S.** The New Taxonomy of Educational Objectives. Second Edition. Corwin Press & Sage Publications, 2007.
11. **The Padagogy Wheel ... It's a Bloomin' Better Way to Teach.** [Электронный ресурс]. URL: <https://designingoutcomes.com/the-padagogy-wheel-its-a-bloomin-better-way-to-teach/> (дата обращения: 19.03.2021).
12. **URL:** <http://burtonslifelearning.pbworks.com/f/Bloom-DigitalTaxonomy2001.pdf> (дата обращения: 19.03.2021).
13. **URL:** <https://zoom.us/> (дата обращения: 19.03.2021).
14. **URL:** <https://jitsi.org.ru/> (дата обращения: 19.03.2021).
15. **URL:** <https://webinar.ru/> (дата обращения: 19.03.2021).
16. **URL:** <https://otzyvmarketing.ru/webinar/> (дата обращения: 19.03.2021).
17. **URL:** <https://ms-teams.ru/> (дата обращения: 19.03.2021).
18. **URL:** <https://zen.yandex.ru/media/znanoio/pliusy-i-minusy-microsoft-teams-5f8708bff12cd832dadbddle> (дата обращения: 19.03.2021).
19. **URL:** <https://www.google.ru/docs/about/> (дата обращения: 19.03.2021).
20. **URL:** <https://edu.google.com/products/classroom/> (дата обращения: 19.03.2021).
21. **URL:** https://www.hse.ru/studyspravka/video_lecture (дата обращения: 19.03.2021).
22. **URL:** <https://lms.hse.ru/> (дата обращения: 19.03.2021).
23. **URL:** <http://www.efrontlearning.net/> (дата обращения: 19.03.2021).
24. **URL:** <https://edu.hse.ru/> (дата обращения: 19.03.2021).
25. **URL:** <https://moodle.org/course/> (дата обращения: 19.03.2021).
26. **URL:** <http://edudemic.com/the-20-best-learning-management-systems/> (дата обращения: 19.03.2021).
27. **URL:** Цифровые сервисы МИЭМ. [Электронный ресурс]. — URL: <https://wiki.miem.hse.ru/docs/miem-digital> (дата обращения: 19.03.2021).
28. **URL:** <https://zulip.com/> (дата обращения: 19.03.2021).
29. **URL:** <https://about.gitlab.com/> (дата обращения: 19.03.2021).
30. **URL:** <https://trello.com/> (дата обращения: 19.03.2021).
31. **URL:** <https://www.google.ru/drive/> (дата обращения: 19.03.2021).
32. **Положение** об организации промежуточной аттестации и текущего контроля успеваемости студентов НИУ ВШЭ. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hse.ru/docs/412086145.html> (дата обращения: 19.03.2021).
33. **URL:** <https://kahoot.com/> (дата обращения: 19.03.2021).
34. **URL:** <https://www.socrative.com/> (дата обращения: 19.03.2021).
35. **Kolb D. A.** Learning styles and disciplinary differences / A. W. Chickering (Ed.) San Francisco, LA: Jossey-Bass. The Modern American College, 1981. P. 232—255.
36. **Meyers J.** Learning Styles: What are They, Models and Discussion [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.cognifit.com/learning-styles/> (дата обращения: 20.03.2021).
37. **Ерохина Е. А., Журин Ю. В.** Автоматизированная рабочая ведомость преподавателя для подсчета успеваемости // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: Матер. семнадцатого науч.-техн. семинара / Под общ. ред.: В. А. Галактионова. М.: Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, 2014. С. 50—57.
38. **Юрин А. И., Красивская М. И., Дмитриев А. В., Злодеев Г. Ю.** Применение виртуальных лабораторных стендов в образовательном процессе // Информационные технологии. 2014. № 6. С. 70—72.
39. **Вишнеков А. В., Иванова Е. М., Басова К. Э., Ветелина Е. О.** Интерактивный учебно-исследовательский комплекс для моделирования процессов в вычислительных системах // Информационные технологии. 2019. Т. 25, № 8. С. 490—501. DOI: 10.17587/it.25.490-501

A. V. Vishnekov, Dr. Tech. Sc., Professor, e-mail: avishnekov@hse.ru,

E. A. Erokhina, e-mail: erokhina@hse.ru,

E. M. Ivanova, Cand. Tech. Sc., Associate Professor, e-mail: emivanova@hse.ru,

National Research University "Higher School of Economics" (NRU HSE), Moscow, 101000, Russian Federation

Digital Technology Implementation Practice during Conversion from Fundamental University Educational System into Online Format

The paper discusses the effectiveness of digital technologies in the educational process. The authors consider the use of digital services in the university educational process in the context of the need to full transfer basic education into online format.

A comparative analysis of public and corporate digital services is carried out. Their advantages and disadvantages are considered the application effectiveness in the educational process. The article examines the following digital services: Zoom, Jitsi, MS Teams, Google Documents, Google Classroom, LMS HSE, Smart LMS. The authors propose the methods of organizing the educational process, involving the integration of these services.

The results of the students' survey revealed the following features that affect the interaction of teachers and students: the Internet speed and availability, preferences in the ways of course materials obtaining, the desired forms of interaction between students and the teacher.

The paper describes the effective methods of conducting online classes in various conditions: group discussion of the pre-voiced and cloud-uploaded presentations in chat, conducting classes in the form of a video-chat, using pre-prepared dynamic graphic illustrations, using gamification elements, laboratory work remote running on a virtual equipment, splitting the lecture into thematic sections and frequent changes in the students' activity.

The authors offer various online forms and methods of learning outcomes intermediate control for the disciplines of the university curriculum. This study offers solutions to the problems of organizing online classes, including in conditions of limited Internet traffic.

Keywords: online learning, digital educational technologies, online-teaching methods

DOI: 10.17587/it.27.494-504

References

1. **National Research University** "Higher School of Economics", available at: <https://www.hse.ru/en/> (Accessed 19.03.2021).
2. **Association** of e-Learning specialists, available at: <http://www.elearningnc.gov> (Accessed: 19.03.2021).
3. **Lapitan L. D., Tiangco C. E., Sumalinog D. A. G., Saborillo N. S., Diaz J. M.** An effective blended online teaching and learning strategy during the COVID-19 pandemic, *Education for Chemical Engineers*, 2021, vol. 35, pp. 116–131.
4. **Waha B., Davis K.** University students' perspective on blended learning, *Journal of Higher Education Policy and Management*, 2014, vol. 36, no. 2, pp. 172–182.
5. **History of pedagogy.** John Dewey: website, available at: <https://www.sites.google.com/site/istoriapedagogiki/dzon-dui> (Accessed: 19.03.2021) (in Russian).
6. **Bloom B. S., Englehart M. D., Furst E. J., Hill W. H., Krathwohl D. R.** The Taxonomy of educational objectives, handbook I: The Cognitive domain, 1956, New York, David McKay Co., Inc.
7. **Marzano R. T., Kendall J. S.** The New Taxonomy of Educational Objectives, Second Edition, Corwin Press & Sage Publications, 2007.
8. **The Pedagogy Wheel ... It's a Bloomin' Better Way to Teach**, available at: <https://designingoutcomes.com/the-pedagogy-wheel-its-a-bloomin-better-way-to-teach/> (Accessed: 19.03.2021).
9. **Available at:** <http://burtonslifelearning.pbworks.com/f/BloomDigitalTaxonomy2001.pdf> (Accessed: 19.03.2021).
10. **Available at:** <https://zoom.us/> (Accessed: 19.03.2021).
11. **Available at:** <https://jitsi.org.ru/> (Accessed: 19.03.2021).
12. **Available at:** <https://webinar.ru/> (Accessed: 19.03.2021).
13. **Available at:** <https://otzyvmarketing.ru/webinar/> (Accessed: 19.03.2021).
14. **Available at:** <https://ms-teams.ru/> (Accessed: 19.03.2021).
15. **Available at:** <https://zen.yandex.ru/media/znano/pliusy-i-minusy-microsoft-teams-5f8708bff12cd832dadbd1e> (Accessed: 19.03.2021).
16. **Available at:** <https://www.google.ru/docs/about/> (Accessed: 19.03.2021).
17. **Available at:** <https://edu.google.com/products/classroom/> (Accessed: 19.03.2021).
18. **Available at:** https://www.hse.ru/studyspravka/video_lecture (Accessed: 19.03.2021).
19. **Available at:** <https://lms.hse.ru/> (Accessed: 19.03.2021).
20. **Available at:** <http://www.efrontlearning.net/> (Accessed: 19.03.2021).
21. **Available at:** <https://edu.hse.ru/> (Accessed: 19.03.2021).
22. **Available at:** <https://moodle.org/course/> (Accessed: 19.03.2021).
23. **Available at:** <http://edudemic.com/the-20-best-learning-management-systems/> (Accessed: 19.03.2021).
24. **MIEM Services:** website, available at: <https://wiki.miem.hse.ru/docs/miem-digital> (Accessed: 19.03.2021) (in Russian).
25. **Available at:** <https://zulip.com/> (Accessed: 19.03.2021).
26. **Available at:** <https://about.gitlab.com/> (Accessed: 19.03.2021).
27. **Available at:** <https://trello.com/> (Accessed: 19.03.2021).
28. **Available at:** <https://www.google.ru/drive/> (Accessed: 19.03.2021).
29. **Regulations** for Interim and Ongoing Assessments of Students at National Research University Higher School of Economics: website, available at: <https://www.hse.ru/docs/412086145.html> (Accessed: 19.03.2021) (in Russian).
30. **Available at:** <https://kahoot.com/> (Accessed: 19.03.2021).
31. **Available at:** <https://www.socrative.com/> (Accessed: 19.03.2021).
32. **Kolb D. A.** Learning styles and disciplinary differences, in: A. W. Chickering (Ed.) *The Modern American College*, San Francisco, LA, Jossey-Bass, 1981, pp. 232–255.
33. **Meyers J.** Learning Styles: What are They, Models and Discussion [Elektronnyj resurs], available at: <https://blog.cognifit.com/learning-styles/> (Accessed 20.03.2021).
34. **Erokhina E. A., ZHurin Yu. V.** Automated teacher's work sheet for calculating progress, *New information technologies in automated systems: materials of the 17th scientific and technical seminar*, Under total. ed.: V. A. Galaktionov. Moscow, Keldysh Institute for Applied Mathematics RAS, 2014, pp. 50–57 (in Russian).
35. **Yurin A. I., Krasivskaya M. I., Dmitriev A. V., Zlo-deev G. Yu.** Virtual Laboratory Stands Application in Education, *Informazionnye Tekhnologii*, 2014, no. 6, pp. 70–72 (in Russian).
36. **Vishnekov A. V., Ivanova E. M., Basova K. E., Vetelina E. O.** Interactive Educational-Research Complex for Processes Simulation in Computer Systems, *Informazionnye Tekhnologii*, 2019, vol. 25, no. 8, pp. 490–501 (in Russian).

Адрес редакции:

107076, Москва, Матросская тишина, 23с2

Телефон редакции журнала +7 916 392 2167

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *М. Ю. Безменова*.

Сдано в набор 08.07.2021. Подписано в печать 19.08.2021. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ IT921. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансд солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансд солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунок к статье А. Ю. Сапарова, А. П. Бельтюкова, С. Г. Маслова

«СРАВНЕНИЕ ТЕКСТОВ ПРОГРАММ С ОТКРЫТЫМ КОДОМ ПРИ ОБНОВЛЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАССТОЯНИЯ ДАМЕРАУ–ЛЕВЕНШТЕЙНА»

1	Если $a > 10$ Тогда	1	Если $a \geq 10$ Тогда
2	$s = a + 3;$	2	$s = a + 3;$
3	$n = s * 2;$	3	$n = s * 2;$
4	$k = n - 2;$	4	$k = n - 2;$
5	Сообщить (k) ;	5	КонецЕсли;
6	КонецЕсли;	6	Сообщить (a) ;

Рис. 7. Пример 1 с новым способом сравнения

Рисунки к статье Д. Ю. Нарцева, А. Н. Гнеушева

«СРАВНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБУЧЕНИЯ ADAM В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ»



а)

б)

Рис. 1. Примеры изображений из баз:
а – BATH; б – CASSIA



Рис. 5. Примеры изображений из базы DeepGlint

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» выпускает научно-технические журналы



Ежемесячный теоретический и прикладной научно-технический журнал **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

Подписной индекс по Объединенному каталогу
«Пресса России» – 72656



Научно-практический
и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79963

Междисциплинарный
теоретический и прикладной
научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано микросистем в различные области науки, технологии и производства.



Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79493



Ежемесячный теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

В журнале освещаются достижения в области мехатроники, интегрирующей механику, электронику, автоматику и информатику в целях совершенствования технологий производства и создания техники новых поколений. Рассматриваются актуальные проблемы теории и практики автоматического и автоматизированного управления техническими объектами и технологическими процессами в промышленности, энергетике и на транспорте.

Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79492

Теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.



Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 22765

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:
107076, Москва, Матросская тишина 23 с2, оф. 45. Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ".
Тел.: +7 (916) 392-21-67. E-mail: antonov@novtex.ru