

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
И ПРИКЛАДНАЯ
ИНФОРМАТИКА**

№ 4, 2021

**SYSTEM ANALYSIS
AND APPLIED
INFORMATION SCIENCE**

No 4, 2021



**Международный
Научно-технический журнал**

Издается с декабря 2012 года

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет

Главный редактор

Сергей Васильевич Харитончик

Редакционная коллегия

В. А. Богущ, Т. В. Борботко, В. Б. Байбурин (РФ),
Д. Ю. Большаков (РФ), Л. С. Герасимович,
Н. Н. Гурский, Ю. М. Захарик, И. А. Каляев (РФ),
Г. О. Кипиани (Грузия), А. А. Лобатый,
Е. И. Никифорович (Украина), А. А. Прихожий,
В. В. Старовойтов, П. П. Урбанович, А. Патрин
(Польша), И. А. Сатиков (ответственный секретарь),
Н. Н. Ташатов (Казakhstan),
А. В. Чигарев, Д. К. Щеглов (РФ)

**International
Science and Technique Journal**

Published since December, 2012

Founder

Belarusian National
Technical University

Editor-in-chief

Sergei V. Kharytonchyk

Editorial board

V. Bogush, T. Borbotko, V. Baiburin (RF),
D. Bolshakov (RF), L. Gerasimovich,
N. Gurskiy, J. Zaharik, I. Kaliyev (RF),
G. Kiplani (Georgia), A. Lobaty,
E. Nikiforovich (Ukraine), A. Prihozhy,
V. Starovoytov, P. Urbanovich,
A. Patrin (Poland), I. Satikov (executive secretary),
N. Tashchatov (Kazakhstan),
A. Chigarev, D. Shcheglov (RF)

Журнал включен в "Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований".

Журнал включен в международные каталоги и базы данных:

- ❖ Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
- ❖ Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU
- ❖ Электронно-библиотечная система (ЭБС) издательства Лань
- ❖ DOAJ <https://doaj.org/toc/2414-0481>
- ❖ Google Scholar
- ❖ Киберленинка
- ❖ EBSCO
- ❖ BASE Search
- ❖ OpenAIRE
- ❖ WorldCat
- ❖ OpenDOAR
- ❖ ROAR

Ответственный секретарь редакции

Сатиков И. А.

Технический редактор

Хвитько Е. А.

Адрес редакции

ул. Франциска Скорины 25/3, Минск, 220114,
Республика Беларусь
Тел. +375 17 266-26-58
e-mail: ca_pi@bntu.by

Executive secretary of the editorial board

I. Satikov

Technical Editor

E. Khvitsko

Editorial board address

25/3 Franciska Skariny str., Minsk, 220114,
Republic of Belarus
Tel. +375 17 266-26-58
e-mail: ca_pi@bntu.by

Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1540
от 08.06.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь

Подписано в печать 13.12.2021. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная.

Цифровая печать. Усл. печ. л. 8,95. Уч.-изд. л. 3,5. Тираж 100 экз. Заказ 767.

Отпечатано в БНТУ. ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.

220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Голуб Ю. И. Оценка качества цифровых изображений	4
Бурый Я. А., Самаль Д. И. Нейроэволюционное подкрепляющее обучение нейронных сетей	16
Старовойтов В. В., Голуб Ю. И., Лукашевич М. М. Оценка качества цифровых изображений сетчатки	25

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ**

Легкоступ В. В., Маркевич В. Э. Методика определения дальности до объекта в разностно-дальномерной навигационной системе по доплеровским смещениям частоты	40
Лобатый А. А., Бумай А. Ю., Авсиевич А. М. Формирование траектории беспилотного лета- тельного аппарата при облете запретных зон	47

**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**

Ганченко В. В., Марушко Е. Е., Поденок Л. П., Инютин А. В. Оценка информативности параметров по- верхностей металлических объектов по 2D- и 3D-данным для классификации изломов.....	55
--	----

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Шарыкин Р. Е. Апробация модели стохастической коллаборационной защиты от вирусов	62
---	----

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ОБРАЗОВАНИИ**

Зеньчук Н. Ф., Салтанова И. В. Целесообразность создания и использования специализированных систем поиска научно- технической информации	72
--	----

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS

Golub Y. I. Image quality assessment	4
Bury Y. A., Samal D. I. Neuroevolutionary reinforcing learning of neural networks	16
Starovoitov V. V., Golub Y. I., Lukashevich M. M. Digital fundus image quality assessment	25

**MANAGEMENT OF TECHNICAL
OBJECTS**

Legkostup V. V., Markevich V. E. Method for determining of the distance to the object in the hyperbolic navigation system via doppler frequency offsets	40
Lobaty A. A., Bumai A. Y., Avsievich A. M. Formation of unmanned aircraft trajectory when flying around prohibited areas	47

**DATA PROCESSING
AND DECISION-MAKING**

Ganchenko V., Marushko E., Podenok L., Inyutin A. Evaluation of metal objects surface parameters informativity using 2D- and 3D-data for classification of fractures	55
--	----

INFORMATION SECURITY

Sharykin R. Approbation of the stochastic group virus protection model	62
---	----

**INFORMATION TECHNOLOGIES
IN EDUCATION**

Zianchuk M. F., Saltanova I. V. Feasibility of creation and use of specialized search systems for scientific and technical information	72
--	----

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

SYSTEM ANALYSIS

Ю. И. ГОЛУБ

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*Государственное научное учреждение «Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси»*

Оценка качества неотъемлемый этап обработки и анализа цифровых изображений в различных автоматизированных системах. По мере увеличения количества и многообразия устройств, позволяющих фиксировать изображения в различных диапазонах электромагнитного спектра, а также расширения сфер деятельности человека, в которых используются информационные технологии (ИТ), растет необходимость оценки качества регистрируемых изображений. Растут требования к представлению цифровых изображений: уменьшается размер пикселя, увеличивается динамический диапазон яркости.

Понятие качества можно трактовать по-разному – в зависимости от целей использования изображений оно может быть связано как с визуальными, так и с художественными особенностями восприятия снимка человеком. В данных исследованиях понятие качества цифрового изображения интерпретируется в контексте точности передачи деталей реальной сцены на ее цифровом представлении, и не учитываются художественные аспекты кадра.

В статье рассматриваются факторы, снижающие качество цифровых изображений, области применения функций оценки качества изображений, способ нормализации мер близости, классы цифровых изображений и их возможные искажения, доступные базы изображений для проведения экспериментов по оценке качества изображений с визуальными оценками экспертов.

Ключевые слова: *цифровое изображение, оценка качества, искажения, классы изображений, базы цифровых изображений, визуальная оценка качества, нормализация данных.*

Введение

В настоящее время полученные цифровые изображения с разнообразных устройств регистрации записываются в различные архивы и базы. С каждым днем, как размер самих изображений, так и размер хранилищ таких данных растет. Для экономии времени и места было бы полезно изображения плохого качества не сохранять и не анализировать. Широко применяемые классические оценки (типа коэффициентов корреляции, среднеквадратического отклонения и т.п.) не подходят в таких ситуациях, поскольку требуется эталонное изображение.

По сравнению с текстовыми и аудиоданными цифровые изображения и видео могут более наглядно представлять информацию, что делает оценку качества важным этапом обработки и анализа в различных автоматизированных системах, работающих с такими данными. На рис. 1 представлен процесс регистрации цифрового изображения. Из приведенной схемы можно заметить, что на качество цифрового изображения отрицательное воздействие могут оказывать следующие факторы:

– точность и правильность настройки устройства регистрации изображения. Например, можно получить смазанный/размытый объект на изображении или получить слишком темное (светлое) изображение из-за неверной настройки экспозиционных параметров при съемке; по данным врачей-рентгенологов компьютерный томограф во время работы хотя бы раз в год должен проходить диагностическую калибровку для выявления отклонений качества изображения [1];

– характеристики аппаратуры, которой было зарегистрировано изображение. Например, резкость объектива (в фотографии объективы делятся на мягкие, нормальные и жесткие [2]), aberrации оптических систем (хроматические или цветовые, геометрические);

– характеристики оборудования, на котором воспроизводят зарегистрированное цифровое изображение. Например, разрешающая способность, цветовой охват и т.д.;

– каналы передачи данных. Например, потеря данных во время передачи (черные или серые полосы на изображениях, пропуск строк изображения), шумы каналов регистрации или

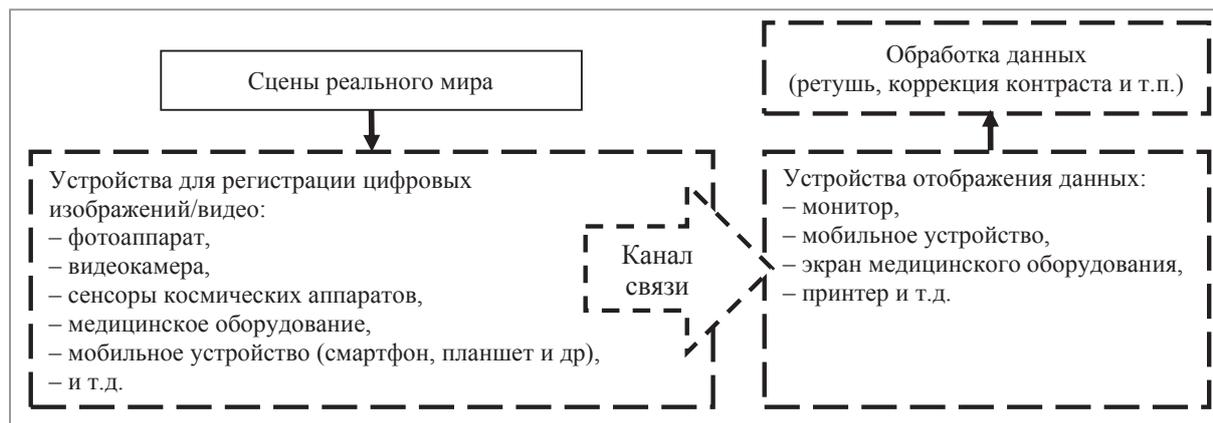


Рис. 1. Схема получения цифрового изображения (этапы, на которых может измениться качество изображения, отображены штрихпунктирной линией)

слишком сильное сжатие данных для пересылки может привести к потере важных деталей изображения, а также к таким искажениям, как блочность, размытие границ, появление ложных контуров, зернистость [3];

- результат компьютерной обработки изображения. Например, увеличение контраста или резкости, ретушь.

Области применения оценки качества цифровых изображений

Оценка качества цифровых изображений используется в разнообразных областях деятельности человека и на различных этапах распространения и передачи визуальной информации, например:

- при выборе методов фильтрации изображений и их параметров, повышении их визуального качества;

- мониторинг качества мультимедийных услуг и повышение качества обслуживания пользователей (например, непрерывный мониторинг сигналов просматриваемой телевизионной программы и в случае обнаружения недопустимого качества изображений автоматически блокировать появление изображения на экран телевизора, заменяя его статическим изображением [4]);

- в автоматизированных системах поиска информации на изображениях, восстановления изображений, поиска и распознавания лиц, а также номеров автомобилей;

- при разработке различных алгоритмов и методов по обработке и анализу изображений. Например, для разработки алгоритмов

сжатия, нанесения водяных знаков, объединения или улучшения изображений, для автоматического выбора лучшего изображения из нескольких;

- в мобильной фотографии (например, для выбора оптимальных настроек камеры или лучшей фотоаппаратуры);

- в системах медицинской визуализации для оценки состояния пациента, диагностики и контроля заболеваний (например, при ультразвуковом исследовании, компьютерной томографии, магнитно-резонансной томографии, рентгенографии, офтальмоскопии и т.д.). По данным подразделения Deep Mining компании Google, каждый десятый пациент страдает из-за неправильной интерпретации медицинской информации [5];

- в видеокамерах и фотокамерах наблюдения, которые снимают длительное время в автоматическом режиме. Оценка качества кадров видео для настройки таких параметров, как выдержка, диафрагма, чувствительность матрицы, в изменяющихся условиях: солнечно/пасмурно, день/ночь/утро и т.д.;

- при получении снимков Земли с космических и авиационных летательных аппаратов в различных форматах (видимого и теплового диапазонов, радарные снимки, гиперспектральные снимки и т.д.).

Требования к функциям оценки качества изображений

Существует множество подходов к построению функций оценки качества [6, 7, 8]. Их описание выходит за рамки данной статьи.

В результате анализа литературы были сформулированы следующие требования к оценочным функциям, которые используются для анализа качества цифровых изображений:

- функция должна вычислять количественную оценку качества изображения, быть согласованной с субъективной экспертной оценкой;

- функция не должна быть слишком сложной и должна быстро вычисляться;

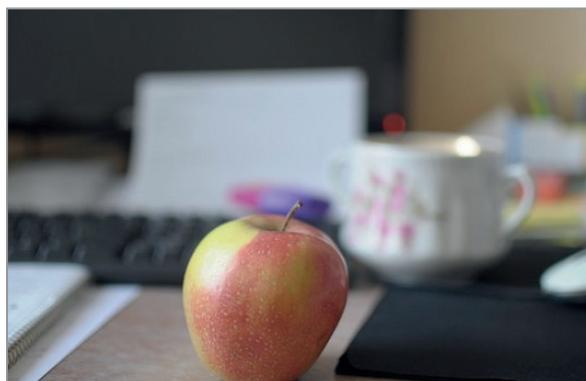
- значения оценки качества не должны линейно зависеть от диапазона яркости анализируемого изображения (например, оценка качества должна быть одинаково эффективной для 8-ми битных полутоновых изображений и 16-ти битных радарных снимков);

- воспроизводимость результатов измерений, т.е. должны быть получены одинаковые результаты оценки на разных компьютерах, с использованием разных операционных систем и языков программирования (при помощи которых реализована оценка качества), разными операторами, в разное время, а также – повторно.

Классы цифровых изображений и их возможные искажения

Требования к качеству цифрового изображения могут изменяться в зависимости от целей его использования. Понятие качества можно трактовать по-разному в зависимости от целей использования изображений: либо изображение ориентировано на восприятие человеком, либо на автоматическое решение определенных задач с помощью информационных технологий. Соответственно, изменяется значимость факторов, определяющих качество (примеры изображений представлены на рис. 2).

Например, при дистанционном зондировании Земли или съемке города, архитектурного сооружения, а также в случаях научного или технического применения фотографии, качество изображения будет тем выше, чем более точно переданы объекты съемки, их геометрия и детали. Для выполнения таких требований, необходимы высокая резкость, хорошая разрешающая способность и контраст. В то же время в портретной и других видах художественной



а



б



в

Рис. 2. Типы изображений в зависимости от количества деталей: а) с малым количеством деталей, б) со средним количеством деталей, в) с большим количеством деталей

фотографии могут специально использоваться определенная размытость или нечеткость отдельных деталей, а также снижение контраста, высветление или затемнение некоторых областей снимка. Таким образом, оценка качества изображения может быть связана как с визуальными, так и с художественными особенностями восприятия снимка человеком. В наших исследованиях будем интерпретировать понятие качества цифрового изображения

в контексте точности передачи деталей реальной сцены на ее цифровом представлении, а не художественные аспекты. В табл. 1 для некоторых классов цифровых изображений представлены наиболее характерные искажения, а на рисунках 3–6 приведены примеры изображений плохого качества.

Космические снимки – это обработанные данные дистанционного зондирования Земли,

представленные в виде цифровых композиций цветных или полутоновых изображений. Поскольку спутники используют разные сенсоры и технологии, информация, предоставляемая разными спутниками, может отличаться. Причинами возникновения шума на космических снимках могут быть следующие факторы: тепловые эффекты, сбои детектора, взаимодействия между электронными

Таблица 1. Возможные искажения для некоторых классов изображений

Классы возможных изображений	Характерные искажения			
	Резкость	Яркость	Контраст	Искажения и их причины
Космические снимки:				
Пассивные системы регистрации: — оптический, ближний и средний инфракрасный диапазон — тепловой инфракрасный диапазон — радиодиапазон — мультиспектральные снимки — гиперспектральные снимки	–	–	+	Возможные искажения: — импульсный шум, пропавшие строки (рис. 3); облачность, тени от облаков и высоких объектов; разные углы падения солнечного света в связи с разным рельефом земной поверхности; влияние окружающей среды и т. п. [9]
Активные системы регистрации: радарные снимки (имеют широкий диапазон яркости – от 0 до 216)	–	–	+	Возможные искажения: -//-; — спекл-шум [10]; — различное пространственное разрешение в результате отклонения от надира; — высокочастотный шум и др.
Медицинская визуализация:				
дентальные снимки	+	–	–	Возможные искажения: смазанные изображения из-за движения человека
компьютерная томография (КТ)	+	+	+	Возможные искажения: зоны повышенной контрастности (рис. 4), двойные контуры из-за движения человека, полосы различной интенсивности и локализации [11]
магнитно-резонансная томография (МРТ)	+	+	+	Возможные искажения: полосы различной интенсивности и локализации, ложные границы объекта и др. (рис. 4)
молекулярная диагностика	+	+	–	
ультразвуковое исследование (УЗИ)	+	+	+	Возможные искажения: нечеткие границы объектов, различные шумы, включая спекл-шум (рис. 5)
рентгенография	+	+	+	Возможные искажения: нечеткие границы объектов, точечный шум, тени
изображения сетчатки	+	+	+	Возможные искажения: зоны повышенного и пониженного контраста, шум в виде пыли, полос (рис. 6)
изображения радужной оболочки глаза (РОГ)	+	+	+	Возможные искажения: шумы в виде ресниц, век
Фотоизображения				
фотографии, полученные при помощи мобильного телефона	+	+	+	Возможные артефакты: шум при высоких значениях светочувствительности (iso), смаз, слишком темные или светлые области
фрактографические изображения (снимки с фотоаппарата, с микроскопа)	+	+	–	Возможные артефакты: разный фон, ракурс съемки и разрешение; надписи на образцах; часть снимка резкая, часть – размыта
Портреты	+	+	–	Возможные артефакты: нерезкое фото из-за движения человека или малой глубины резко изображаемого пространства (ГРИП)
Пейзаж	–	+	–	

компонентами системы формирования изображения, ошибки дискретизации, ошибки передачи и др. [9]. Шумы на изображении появляются в самых разнообразных формах. На рис. 3 представлены различные виды шумов на снимках Земли.

Еще один класс широко используемых изображений – медицинские. В современном мире медицинская визуализация достигла большого распространения из-за возможности представить внутренние структуры тела для клинического анализа или медицинского вмешательства, а также визуально представить функций некоторых органов или тканей. Сегодня получение различной информации о состоянии человеческого организма предоставляет множество возможностей для клинического применения. В течение многих

лет развивались различные способы медицинской визуализации, каждый со своими преимуществами и недостатками. На рис. 4 представлены изображения компьютерной томографии и магнитно-резонансной томографии с артефактами в виде зон повышенной контрастности, ложными контурами (обозначены стрелками на изображении), вертикальными полосами. На рис. 5 представлены примеры ультразвуковых изображений – исходное со спекл-шумом и отфильтрованное. Как видно из рис. 5б, в результате фильтрации улучшается связь между неоднородными участками тканей различных органов, снимок становится более легким для интерпретации за счет повышения качества визуализации контуров, структур тканей и мелких деталей.

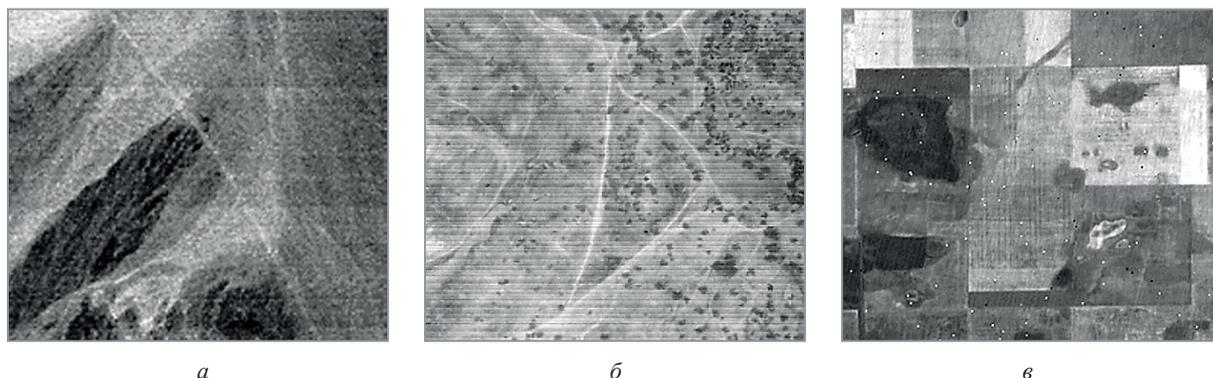


Рис. 3. Космические снимки с различными шумами: *а* – глобальный случайный, *б* – полосовой, *в* – импульсный

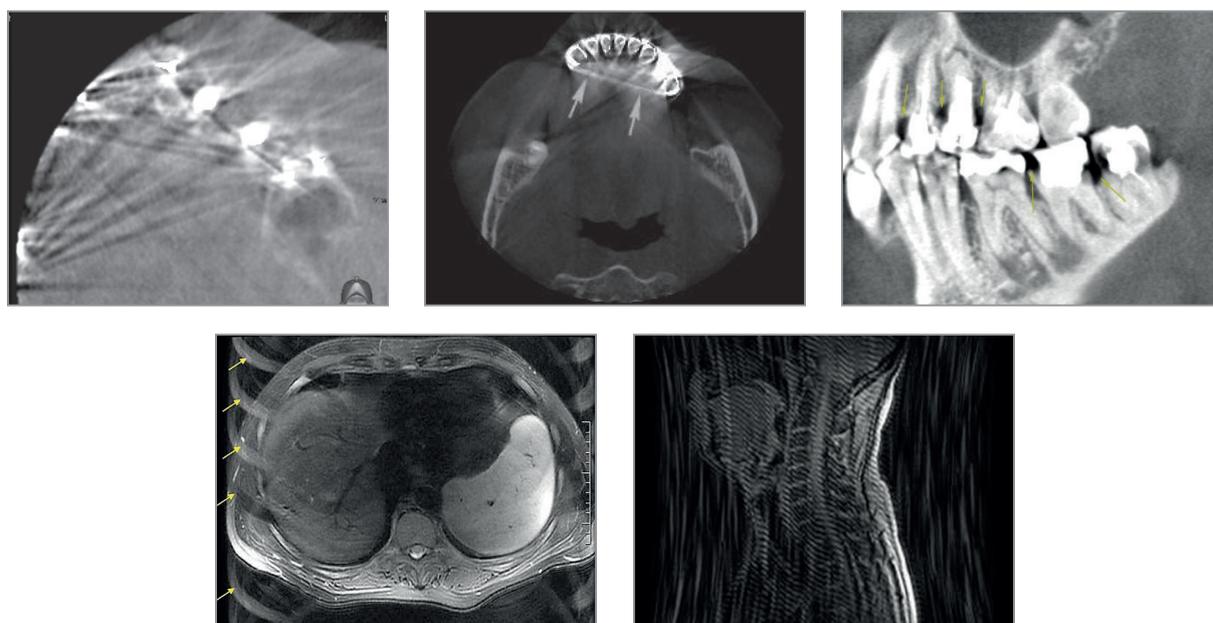


Рис. 4. Изображения с артефактами: верхний ряд – изображения КТ с зонами повышенной контрастности, нижний ряд – изображения МРТ с ложными контурами и вертикальными полосами

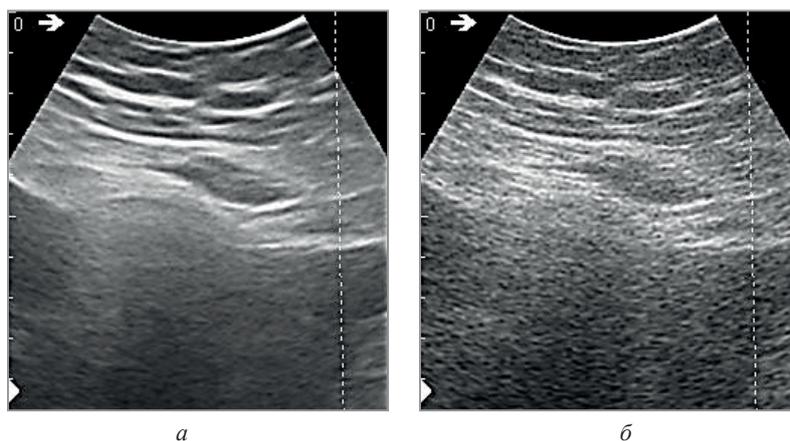


Рис. 5. Изображения, получаемые при ультразвуковом исследовании печени:
a – исходное изображение; *б* – результат фильтрации спекл-шума



Рис. 6. Изображения сетчатки разного качества

Доступные базы цифровых изображений с экспертными оценками

Для экспериментального анализа существующих оценочных функций качества цифровых изображений, а также разработки новых функций, необходимо использовать базы изображений с различными искажениями. Для понимания того, насколько та или иная функция соответствует визуальной оценке человека, необходимо, чтобы используемые базы данных (БД) состояли не только из большого количества изображений из различных классов и с разнообразными искажениями, но и содержали визуальные оценки экспертов (экспертные оценки – mean opinion score (MOS) или difference mean opinion score (DMOS)). Обычно, визуальная оценка всей базы изображений дело долгое, трудозатратное и дорогостоящее, поэтому общедоступных баз с экспертными оценками не так много. И они содержат изображения с искусственно созданными искажениями. В результате анализа литературы была составлена сводная таблица с базами

изображений (табл. 2), которые используются в экспериментальных исследованиях в области оценки качества. Все представленные базы содержат визуальные оценки экспертов.

Как показали эксперименты [23] на разных базах изображений, как с искусственными искажениями, так и естественными, оценочные функции качества могут иметь разный диапазон значений (табл. 3). Для сравнения таких функций необходимо предварительно выполнять их нормализацию.

Меры близости и их нормализация

Меры близости часто используются в задачах интеллектуального анализа данных (Data Mining, например, в кластеризации, классификации и т.д.). Также эти понятия могут быть использованы в задачах оценки качества изображений. Термин «близость» используется для обозначения сходства (подобия или similarity) или несходства (различия или dissimilarity) объектов или данных [30].

Т а б л и ц а 2. Доступные базы двумерных цифровых изображений

Название БД	Количество, размер и формат исходных изображений	Количество искаженных изображений, год выхода БД	Диапазон экспертных оценок	Виды искажений	Количество экспертов, которые оценивали изображения
CCID 2014 [12]	15 первых изображений из базы Kodak [13], 768x512 пк, глубина цвета – 24 бита, формат файлов – PNG	655 шт, 2013 год	MOS [0; 5]	Нелинейное изменение контраста (mean-shift, гамма-коррекция и др.)	22
CSIQ [14]	30, 512x512 пк, глубина цвета – 24 бита, формат файлов – PNG	866 шт, 2010 год	DMOS [1.39; 4.4]	5 категорий изображений: животные, пейзаж, люди, растения, город. 6 видов искажений: JPEG, JPEG2000, глобальное снижение контраста, шум, размытие Гаусса (для контраста – 4 уровня искажений, для остальных – 5 уровней)	35
IVC [15]	10, 512x512 пк, глубина цвета – 24 бита, формат файлов – BMP	185 шт, 2005 год	MOS [1; 4.9]	4 вида искажений: JPEG, JPEG2000, кодирование с локальным адаптивным разрешением (LAR coding), размытие Гаусса	15
LIVE версия 1 [16–18]	29, 768x512 пк, глубина цвета – 24 бита, формат файлов – BMP	450 шт, 2002 год	MOS [0; 100]	JPEG2000, JPEG	20
LIVE Версия 2 [16–18]	29, от 610x488 до 768x512 пк, глубина цвета – 24 бита, формат файлов – BMP	779 шт, 2005 год	DMOS [0; 85]	5 видов искажений: JPEG2000 (175 изображений), JPEG (169 изображений), белый шум (145 изображений), размытие Гаусса (145 изображений), имитация битовых ошибок (145 изображений)	20–29
MICT (Toyama) [19]	14, 768x512пк, глубина цвета – 24 бита, формат файлов – BMP	168 шт, 2008 год	–	JPEG, JPEG2000; 7 уровней искажений	16
TID 2008 [20]	25 изображений из базы Kodak [13], 512x384 пк, глубина цвета – 24 бита, формат файлов – BMP	1700 шт, 2008 год	MOS [0; 7.7]	17 видов искажений, 4 уровня каждого искажения	838
TID 2013 [21]	25 изображений из базы Kodak [13], 512x384 пк, глубина цвета – 24 бита, формат файлов – BMP	3000 шт, 2013 год	MOS [0.24; 7.2]	24 вида искажений, 5 уровней каждого искажения	971
VCL@FER [22]	23, 683x512	552 шт, 2012 год	MOS [1.6; 97]	4 типа искажений: additive Gaussian white noise, Gaussian blurring, JPEG compression, JPEG2000 compression. 6 уровней каждого искажения	118 чел

Т а б л и ц а 3. Диапазоны значений локальных мер качества для изображений разных баз

Искажение	Функция оценки качества				
	VEGH [24]	BREN [25]	CON3 [26]	FUS [27]	LOEN [28]
TID2013 (125 изображений одного искажения), [21]					
01	[0; 1]	[0; 65025]	[0; 255]	[0; 1161288]	[2.18; 6.3]
06	[0; 1]	[0; 64516]	[0; 255]	[0; 1255696]	[0; 6.3]
08	[0; 1]	[0; 47961]	[0; 255]	[0; 1040404]	[0; 6.3]
09	[0; 1]	[0; 62500]	[0; 255]	[0; 1143072]	[0; 6.2]
17	[0; 1]	[0; 65025]	[0; 255]	[0; 1300500]	[0; 6.3]
CSIQ Lab , 142 изображения [29]					
	[0; 0.9]	[0; 51984]	[0; 255]	[0; 973444]	[0; 6.3]
CCID2014 , 670 изображений, [12]					
	[0; 1]	[0; 65025]	[0; 255]	[0; 1298464]	[0; 6.3]

Сходство (С) между двумя изображениями – это числовая мера степени их совпадения, которая чаще всего имеет значения в диапазоне от 0 (нет сходства) до 1 (полное сходство). Таким образом, значение меры сходства выше для пар более похожих объектов.

Несходство (Н) между двумя объектами – это числовая мера степени различия этих объектов. Несходство меньше для более похожих пар объектов. Часто термин «расстояние» используется как синоним несходства. Значения меры несходства обычно находятся в диапазоне от 0 до 1.

Эти две меры противоположны по значению и связаны соотношением $C = 1 - H$.

Нормализация значений мер близости

Иногда значения мер близости с конечным диапазоном необходимо нормализовать. Для этого можно использовать следующую формулу:

$$p' = (p - \min(p)) / (\max(p) - \min(p)), \quad (1)$$

где p и p' – исходное и нормализованное значения меры, соответственно; $\min(p)$ и $\max(p)$ являются минимальным и максимальным значениями меры близости соответственно.

Если мера близости изначально принимает значения в интервале $[0, \infty]$, то для нормализации значений к диапазону $[0, 1]$ часто используется формула:

$$p'' = p / (1 + p). \quad (2)$$

где p и p'' – исходное и нормализованное значения меры близости.

Пример

Если значения меры сходства между объектами варьируется от 1 (совсем не похоже) до 10 (полностью похоже), можно нормализовать значения в диапазон значений $[0, 1]$, используя формулу:

$$p' = (p - 1) / 9, \quad (3)$$

где p и p' – исходное и нормализованное значения меры, соответственно.

Шкалы измерения качества цифровых изображений

В идеальном случае исследователям и разработчикам различных автоматизированных систем хотелось бы иметь комплексную оценочную функцию качества для изображения, полученного любым устройством и любого формата. Но как показывают эксперименты, для разных типов искажений, для разных баз тестовых данных и разных задач необходимы различные функции оценки качества или индивидуальные настройки существующих функций [23, 31–33]. Наиболее простой случай для выбора функции оценки, когда заранее определены условия и формат съемки, получаемые искажения и определена узкая задача, в рамках которой необходимо оценить качество цифровых изображений. Например, для задач идентификации людей по фотопортрету, либо по радужной оболочке глаз функции оценки качества исходных изображений будут вычислять разные характеристики и иметь различные пороговые значения при делении на качественные и некачественные фотографии.

Классификация шкал

Измерение – это операция, которая данному наблюдаемому состоянию объекта, процесса, явления ставит в соответствие определенное обозначение: число, номер или символ [34].

Любое измерение или количественное оценивание чего-либо осуществляется, с использованием соответствующей шкалы. Шкалы измерений классифицируются по типам измеряемых данных, которые определяют допустимые для данной шкалы отношения, в том

числе те, что соответствуют математическим операциям над величинами конкретной шкалы [34, 35].

Наиболее часто используемая (но не единственная) классификация шкал была предложена в 1946 году Стэнли Смитом Стивенсом [36]. В соответствии с ней существуют следующие шкалы: номинальная, порядковая, интервальная, шкала отношений (рис. 6, табл. 4). В статье [37] дополнительно предложена шкала частей. Примеры типов данных, которые можно описывать с использованием разных шкал приведены в табл. 4.

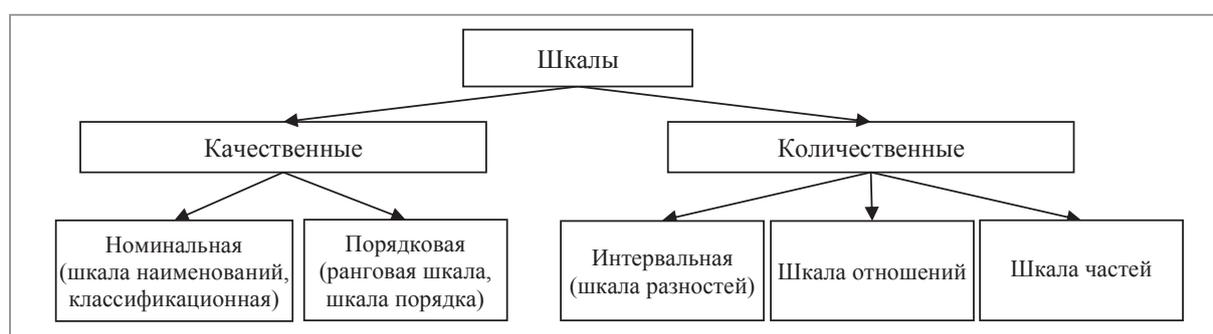


Рисунок 6 – Типы измерительных шкал

Таблица 4. Примеры данных для разных измерительных шкал

Тип шкалы	Номинальная	Порядковая	Интервальная	Отношений	Частей
Пример данных	ФИО, номера домов, географические названия, флаги государств	Нумерация очередности, школьные оценки, призовые места в конкурсе	Температура, время, высота местности	Длина, вес, деньги	Процент в долях, к. п. д., часть угла, вероятность

Составление шкал для измерения субъективных ощущений

Составление шкал для измерения субъективных ощущений – сложная задача. Для этого в первую очередь должны быть решены два задачи: выбор объема (количество баллов) шкалы и выявление взаимосвязи между интенсивностью отдельных признаков качества и цифровыми значениями шкалы. При выборе объема шкалы руководствуются требуемой степенью точности, надежностью результатов и числом различимых уровней качества. Градацию шкалы определяют в зависимости от поставленной задачи, качества экспертов, необходимой точности результатов и возможности словесного описания характеристики качественных уровней [38].

Заключение

Для решения задачи оценки качества изображения необходимо найти количественные оценки, которые наилучшим образом соответствуют субъективным. В статье [33] авторы приходят к выводу, что одна и та же мера может показывать разные результаты на разных базах изображений. Также в статье [39] авторы делают заключение, что большинство количественных оценок качества предназначено для смоделированных искажений, которые редко присутствуют на реальных снимках после регистрации. Поэтому создание тестовой базы изображений с реальными искажениями, визуальной оценкой экспертов и большим размером кадров является актуальной задачей.

Работа частично выполнена в рамках гранта для докторантов, проектов БРФФИ Ф20РА-014 и Ф21ПАКГ-001

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сердобинцев, Е. В.** Артефакты и искажения при конусно-лучевой компьютерной томографии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dentalxray.university/a2>. – Дата доступа: 07.06.2021.
2. **Гонта, А.** Резкость изображения и оборудование CCTV / А. Гонта, Е. Седов // Алгоритм безопасности. – 2007. – № 1. – С. 30–32.
3. **Гонсалес, Р.** Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
4. Сборник «Цифровое телевизионное вещание. Везде и всегда. Для всех и для каждого» под редакцией В. В. Бутенко, 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://niir.ru/news/publikacii/2436-2/razdel-11-ocenka-kachestva-izobrazhenij-kontrol-i-izmereniya-parametrov-tv-traktov/>. – Дата доступа: 07.06.2021.
5. DeepMind Technologies Limited [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://deepmind.com>. – Дата доступа: 01.04.2021.
6. **Chandler, D. M.** Seven challenges in image quality assessment: past, present, and future research // International Scholarly Research Notices. – 2013. – Т. 2013. – P. 1–53.
7. **Pertuz, S.** Analysis of focus measure operators for shape-from-focus / S. Pertuz, D. Puig, M. A. Garcia // Pattern Recognition. – 2013. – Vol. 46. – № 5. – P. 1415–1432.
8. **Zhai, G.** Perceptual image quality assessment: a survey / G. Zhai, X. Min // Science China Information Sciences. – 2020. – V. 63. – № 11. – P. 83–135.
9. **Забелин, С. А.** Обзор основных видов шумов на спутниковых снимках и методов фильтрации / С. А. Забелин, А. Д. Тулегулов // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 100–1005.
10. **Старовойтов, В. В.** Методика выбора фильтра для сглаживания спекл-шума радарных изображений с синтезированной апертурой / В. В. Старовойтов // Информатика. – 2016. – № 2. – С. 5–11.
11. **Кокорев П. А.** Анализ артефактов изображений в компьютерной томографии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – № . 47.
12. **Gu, K.** Subjective and objective quality assessment for images with contrast change / K. Gu [et al.] // Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, Melbourne, VIC, Australia. – 2013. – P. 383–387.
13. Kodak Lossless True Color Image Suite [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://r0k.us/graphics/kodak/>. – Дата доступа: 05.04.2021.
14. **Larson, E. C.** Most Apparent Distortion: Full-Reference Image Quality Assessment and the Role of Strategy / E. C. Larson, D. M. Chandler // Journal of Electronic Imaging. – March 2010. – Vol. 19. – № 1. – P. 011006:1–011006:21.
15. **Ninassi, A.** Pseudo No Reference image quality metric using perceptual data hiding / A. Ninassi, P. L. Callet, F. Atrousseau // in Human Vision and Electronic Imaging. – Vol. 6057 of Proceedings of SPIE. – January 2006. – P. 146–157.
16. **Wang Z. [et al.]** Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // IEEE transactions on image processing. – 2004. – V. 13. – № 4. – P. 600–612.
17. **Sheikh, H. R.** A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms / H. R. Sheikh, M. F. Sabir, A. C. Bovik // IEEE Transactions on Image Processing. – November, 2006. – Vol. 15. – № 11. – P. 3440–3451.
18. LIVE Image Quality Assessment Database Release 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>. – Дата доступа: 05.04.2021.
19. **Tourancheau, S., Atrousseau, F., Sazzad, Z.M.P., Horitaa, Y.** MICT image quality evaluation database. – 2008.
20. **Ponomarenko, N., Lukin, V., Zelensky, A., Egiazarian, K., Carli, M., Battisti, F.** Tampere image database. – 2008.
21. **Ponomarenko, N. [et al.]** Image database TID2013: Peculiarities, results and perspectives // Signal Processing: Image Communication. – 2015. – Т. 30. – P. 57–77.
22. **Zaric, A. et al.** VCL@FER Image Quality Assessment Database // AUTOMATIKA. – 2012. – Vol. 53. – № 4. – P. 344–354.
23. **Голуб, Ю. И.** Исследование безэталонных локальных оценок качества изображений / Ю. И. Голуб, Ф. В. Старовойтов, В. В. Старовойтов // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Физика, математика, информатика. – 2019. – № 5. – С. 15–18.
24. **Beghdadi, A.** Contrast enhancement technique based on local detection of edges / A. Beghdadi, A. Le Negrate // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. – 1989. – 46(2). – P. 162–174. DOI: 10.1016/0734-189X(89)90166-7
25. **Santos, A. [et al.]** Evaluation of autofocus functions in molecular cytogenetic analysis // Journal of Microscopy. – 1997. – V.188. – № 3. – P. 264–272.
26. **Guan, J. [et al.]** No-reference Blur Assessment Based on Edge Modeling // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 2015. – V. 29. – P. 1–7.
27. **Tian, J.** Multi-focus image fusion using a bilateral gradient-base sharpness criterion / J. Tian, L. Chen, L. Ma, W. Yu // Optics communications. – 2011. – 284 (1). – P. 80–87. DOI: doi.org/10.1016/j.optcom.2010.08.085
28. **Старовойтов, В. В.** Сравнительный анализ безэталонных мер оценки качества цифровых изображений / В. В. Старовойтов, Ф. В. Старовойтов // Системный анализ и прикладная информатика. – 2017. – Т. 13. – № 1. – С. 24–31.
29. **Larson, E. C.** Most Apparent Distortion: Full-Reference Image Quality Assessment and the Role of Strategy / E. C. Larson, D. M. Chandler // Journal of Electronic Imaging. – March 2010. – V. 19. – № 1. – P. 011006:1–011006:21.

30. **Von Luxburg U.** Statistical learning with similarity and dissimilarity functions: дис.– Technische Universität Berlin Berlin, Germany, 2004.
31. **Kocić, J.** Image quality parameters: A short review and applicability analysis / J. Kocić, I. Popadić, B. Livada // 7th Int. Sci. Conf. Defensive Technol.–2016.
32. **Xu, S.** No-reference/blind image quality assessment: a survey / S. Xu, S. Jiang, W. Min // IETE Technical Review.–2017.– Vol. 34.– № 3.– P. 223–245.
33. **Dumic, E.** IQM2 – New image quality measure based on steerable pyramid wavelet transform and structural similarity index / E. Dumic, S. Grgic, M. Grgic // Signal, Image and Video Processing.–2014.– V. 8.– № 6.– P. 1159–1168.
34. **Перегудов, Ф.И.** Введение в системный анализ / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасевич.– М.: Высшая школа, 1989.– 367 с.
35. **Анфилатов, В.С.** Системный анализ в управлении / В.С. Анфилатов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин – М. Финансы и статистика, 2002.– 368 с.
36. Шкала [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D0%BA%D0%B0%D0%BB%D0%B0>.– Дата доступа: 01.06.2021.
37. **Старовойтов, В.В.** Нормализация данных в машинном обучении / В.В. Старовойтов, Ю.И. Голуб // Информатика. 2021.– в печати.
38. **Киселев Э.В.** Прикладная квалиметрия: Конспект лекций / Э.В. Киселев, М.Е. Ильина.– Рыбинск, 2015.– 52 с.: ил.
39. **Zhu, W. [et al.]** A multiple attributes image quality database for smartphone camera photo quality assessment // 2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP).– IEEE, 2020.– P. 2990–2994.

REFERENCES

1. **Serdobincev, E. V.** Артефакты и искажения при конусно-лучевой компьютерной томографии [Online].– Available: <https://dentalxray.university/a2>.– Date: 07.06.2021.
2. **Gonta, A.** Резкость изображения и оборудование CCTV / A. Gonta, E. Sedov // Алгоритм безопасности.– 2007.– № 1.– P. 30–32.
3. **Gonzalez, R.** Digital Image Processing / R. Gonzalez, R. Woods.– 2006.– 1072p.
4. Сборник «Цифровое телевизионное вещание. Везде и всегда. Для всех и для каждого» под редакцией В. В. Бутенко, 2014 [Online].– Available: <https://niir.ru/news/publikacii/2436-2/razdel-11-ocenka-kachestva-izobrazhenij-kontrol-i-izmereniya-parametrov-tv-traktov/>.– Date: 07.06.2021.
5. DeepMind Technologies Limited [Online].– Available: <https://deepmind.com>.– Date: 01.04.2021.
6. **Chandler, D. M.** Seven challenges in image quality assessment: past, present, and future research // International Scholarly Research Notices.– 2013.– T. 2013.– P. 1–53.
7. **Pertuz, S.** Analysis of focus measure operators for shape-from-focus / S. Pertuz, D. Puig, M. A. Garcia // Pattern Recognition.– 2013.– Vol. 46.– № 5.– P. 1415–1432.
8. **Zhai, G.** Perceptual image quality assessment: a survey / G. Zhai, X. Min // Science China Information Sciences.– 2020.– V. 63.– № 11.– P. 83–135.
9. **Zabelin, S. A.** Обзор основных видов шумов на спутниковых снимках и методов фильтрации / S. A. Zabelin, A. D. Tulegulov // Reliability & Quality of Complex Systems.– 2013.– № 2.– P. 100–1005.
10. **Starovotov, V. V.** Method of filter selection for speckle-noise smoothing in sar images / V. V. Starovotov // Informatics.– 2016.– № 2.– P. 5–11.
11. **Kokorev P. A.** Анализ артефактов изображений в компьютерной томографии // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics.– 2008.– № 47.
12. **Gu, K.** Subjective and objective quality assessment for images with contrast change / K. Gu [et al.] // Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, Melbourne, VIC, Australia.– 2013.– P. 383–387.
13. Kodak Lossless True Color Image Suite [Online].– Available: <http://r0k.us/graphics/kodak/>.– Date: 05.04.2021.
14. **Larson, E. C.** Most Apparent Distortion: Full-Reference Image Quality Assessment and the Role of Strategy / E. C. Larson, D. M. Chandler // Journal of Electronic Imaging.– March 2010.– Vol. 19.– № 1.– P. 011006:1–011006:21.
15. **Ninassi, A.** Pseudo No Reference image quality metric using perceptual data hiding / A. Ninassi, P. L. Callet, F. Atrousseau // in Human Vision and Electronic Imaging.– Vol. 6057 of Proceedings of SPIE.– January 2006.– P. 146–157.
16. **Wang Z. [et al.]** Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // IEEE transactions on image processing.– 2004.– V. 13.– № 4.– P. 600–612.
17. **Sheikh, H. R.** A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms / H. R. Sheikh, M. F. Sabir, A. C. Bovik // IEEE Transactions on Image Processing.– November, 2006.– Vol. 15.– № 11.– P. 3440–3451.
18. LIVE Image Quality Assessment Database Release 2 [Online].– Available: <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>.– Date: 05.04.2021.
19. **Tourancheau, S., Atrousseau, F., Sazzad, Z. M. P., Horitaa, Y.** MICT image quality evaluation database.– 2008.
20. **Ponomarenko, N., Lukin, V., Zelensky, A., Egiazarian, K., Carli, M., Battisti, F.** Tampere image database.– 2008.
21. **Ponomarenko, N. [et al.]** Image database TID2013: Peculiarities, results and perspectives // Signal Processing: Image Communication.– 2015.– V. 30.– P. 57–77.
22. **Zaric, A. [et al.]** VCL@FER Image Quality Assessment Database // АВТОМАТИКА.– 2012.– Vol. 53.– № 4.– P. 344–354.
23. **Golub, Y. I.** Study of no-reference local image quality assessments / Y. I. Golub, F. V. Starovoitov, V. V. Starovoitov // Vestnik BrSTU.– 2019.– № 5.– P. 15–18.

24. **Beghdadi, A.** Contrast enhancement technique based on local detection of edges / A. Beghdadi, A. Le Negrate // Computer Vision, Graphics, and Image Processing.– 1989.– 46(2).– P. 162–174. DOI: 10.1016/0734-189X(89)90166-7
25. **Santos, A. [et al.]** Evaluation of autofocus functions in molecular cytogenetic analysis // Journal of Microscopy.– 1997.– V.188.– № 3.– P. 264–272.
26. **Guan, J. [et al.]** No-reference Blur Assessment Based on Edge Modeling // Journal of Visual Communication and Image Representation.– 2015.– V. 29.– P. 1–7.
27. **Tian, J.** Multi-focus image fusion using a bilateral gradient-base sharpness criterion / J. Tian, L. Chen, L. Ma, W. Yu // Optics communications.– 2011.– 284 (1).– P. 80–87. DOI: doi.org/10.1016/j.optcom.2010.08.085
28. **Starovotov, V.V.** Comparative analysis of no-reference quality measures for digital images / V.V. Starovotov, F.V. Starovotov // System analysis and applied information science.– 2017.– V. 13.– № 1.– P. 24–31.
29. **Larson, E. C.** Most Apparent Distortion: Full-Reference Image Quality Assessment and the Role of Strategy / E. C. Larson, D. M. Chandler // Journal of Electronic Imaging.– March 2010.– V. 19.– № 1.– P. 011006:1–011006:21.
30. **Von Luxburg, Ulrike.** Statistical learning with similarity and dissimilarity functions. Diss. Technische Universität Berlin Berlin, Germany, 2004.
31. **Kocić, J.** Image quality parameters: A short review and applicability analysis / J. Kocić, I. Popadić, B. Livada // 7th Int. Sci. Conf. Defensive Technol.– 2016.
32. **Xu, S.** No-reference/blind image quality assessment: a survey / S. Xu, S. Jiang, W. Min // IETE Technical Review.– 2017.– Vol. 34.– № 3.– P. 223–245.
33. **Dumic, E.** IQM2 – New image quality measure based on steerable pyramid wavelet transform and structural similarity index / E. Dumic, S. Grgic, M. Grgic // Signal, Image and Video Processing.– 2014.– V. 8.– № 6.– P. 1159–1168.
34. **Peregudov F.I.** Введение в системный анализ / F.I. Peregudov, F.P. Tarasevich.– М.: Высшая школа, 1989.– 367 p.
35. **Anfilatov V.S.** Системный анализ в управлении / V.S. Anfilatov, A. A. Emel'janov, A. A. Kukushkin – М. Финансы и статистика, 2002.– 368 p.
36. Level of measurement [Online].– Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Level_of_measurement.– Date: 01.06.2021.
37. **Starovotov V.V., Golub Y.I.** Data Normalization in Machine Learning. Informatics. 2021 (in print).
38. **Kiselev E.V.** Прикладная квалиметрия: Конспект лекций / E. V. Kiselev, M. E. П'ina.– Рыбинск, 2015.– 52 p.
39. **Zhu, W. [et al.]** A multiple attributes image quality database for smartphone camera photo quality assessment // 2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP).– IEEE, 2020.– P. 2990–2994.

Поступила
08.11.2021

После доработки
18.11.2021

Принята к печати
01.12.2021

GOLUB Y. I.

IMAGE QUALITY ASSESSMENT

United institute of informatics problems of the National Academy of Sciences of Belarus

Quality assessment is an integral stage in the processing and analysis of digital images in various automated systems. With the increase in the number and variety of devices that allow receiving data in various digital formats, as well as the expansion of human activities in which information technology (IT) is used, the need to assess the quality of the data obtained is growing. As well as the bar grows for the requirements for their quality.

The article describes the factors that deteriorate the quality of digital images, areas of application of image quality assessment functions, a method for normalizing proximity measures, classes of digital images and their possible distortions, image databases available on the Internet for conducting experiments on assessing image quality with visual assessments of experts.

Keywords. *Digital image, image quality assessment, distortions, image classes, digital image databases, visual quality assessment, data normalization.*



Голуб Юлия Игоревна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси».

Yuliya I. Golub, PhD, Associate Professor, Senior Research Fellow at the United Institute of Informatics Problems, National Academy of Sciences of Belarus, Email: 6423506@gmail.com.

Я. А. БУРЫЙ, Д. И. САМАЛЬ

НЕЙРОЭВОЛЮЦИОННОЕ ПОДКРЕПЛЯЮЩЕЕ ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

В статье представлены результаты объединения 4-х различных типов обучения нейронных сетей: эволюционного, с подкреплением, глубокого и экстраполирующего. Последние два используются в качестве первичного метода уменьшения размерности входного сигнала системы и упрощения процесса её обучения с точки зрения вычислительной сложности.

В представленной работе нейросетевая структура управляющего устройства моделируемой системы формируется в ходе эволюционного процесса, с учётом известных на текущий момент особенностей строения и развития самообучающихся систем, имеющих место в живой природе. Данный способ его конструирования даёт возможность обойти специфические ограничения моделей, созданных на основе рекомбинации уже известных топологий нейронных сетей.

Ключевые слова: *Нейронные сети, нейронная сеть свёртки, нейроэволюция, эволюционные алгоритмы, генетический алгоритм, распознавание изображений, распознавание символов, распознавание текста, обучение нейронных сетей, глубокое обучение, обучение с подкреплением.*

Введение

В последнее время нейросетевые модели отлично себя показали в различных направлениях искусственного интеллекта и, вследствие способности к некоторой имитации мыслительной деятельности человека, нашли широкое применение в качестве классификаторов во многих типах систем распознавания и принятия решений.

Среди их разновидностей следует особо выделить нейронные сети свёрточного типа, обладающие неплохой способностью к обобщению поступающей на их входы информации и инвариантностью к различным небольшим искажающим деформациям входного сигнала.

Несмотря на достигнутые успехи в области решения задач математического программирования с помощью нейронных сетей, сложившийся инструментарий их разработки базируется на сочетании уже известных типов структур. Это даёт возможность решения многих типов задач, однако требует соблюдения различных специальных условий для обеспечения заданного качества работы моделей, — таких, как хорошая выровненность фотографий, отсутствие сильных искажений,

соответствие шаблонам. Выполнение этих условий может быть соблюдено в таких прикладных задачах, как, например, распознавание паспортов или анкетных данных.

Вместе с тем, согласно теореме Коско о нечёткой аппроксимации, любую математическую систему можно аппроксимировать системой на нечёткой логике. При этом любую из существующих логических функций можно аппроксимировать при помощи многослойных нейронных сетей с разной точностью [1].

Вследствие подобия эволюционных алгоритмов с аналогичными процессами, имеющими место в живой природе, и в результате которых возникли биологические интеллектуальные системы, предположительно именно с их помощью должно быть возможно воспроизведение и подобных этим системам вероятностных моделей, способных адаптироваться к некоторой внешней среде, интерпретирующей их поведение.

Биологические прототипы искусственных интеллектуальных систем обладают способностью приспособления практически к любым условиям существования. Несмотря на то, что на текущий момент нет возможности точно повторить топологию связей в естественных

нейронных сетях, возможно предпринять попытку воспроизведения самого процесса их формирования, в надежде получить универсальный механизм оптимизации приемлемого качества, пригодный для решения максимально широкого перечня типов интеллектуальных задач.

Задача создания подобного механизма является актуальной, т.к. существует, например, насущная потребность в разработке универсальной системы распознавания текста, инвариантной к различным существенным искажениям, изменению масштабов, поворотам и другим трансформациям входных изображений.

Постановка задачи

Обучение с подкреплением подразумевает максимизацию числового значения некоторого сигнала вознаграждения обучаемой системой посредством модификации своего поведения под воздействием информации из окружающей среды. При этом система обучается не по заданным заранее примерам реакций в ответ на конкретные стимулы, как это происходит в большинстве обучающих методов, а, вероятно взаимодействуя со средой, стремится выработать такие реакции, которые принесли бы ей наибольшее вознаграждение.

Таким образом, обучение с подкреплением определяется не с помощью формального описания методов обучения, а через выявление характерных особенностей задачи обучения, а любой метод, который хорошо подходит для решения описанной выше задачи, может рассматриваться в качестве метода обучения с подкреплением [2].

В отличие от классического обучения с подкреплением, которое не предполагает использование эволюционных методов [2], т.к., якобы, в процессе обучения с учителем «доступно намного больше подробной информации о том, как обучаться, чем может быть учтено в эволюционных методах», нейроэволюционное подкрепляющее обучение основывается на применении строго эволюционных методов при конструировании обучающегося и принимающего решения нейросетевого агента [2] для оптимизации значения некоторой функции оценки его поведения.

Следует заметить, что эволюционные алгоритмы достаточно универсальны для применения также при обучении с учителем, которое, в таком случае, может предполагать использование управляемого искусственного отбора для оптимизации как внутренней структуры классификатора, так и состояния этой структуры под воздействием сигналов от среды обитания.

Кроме того, представленный способ обучения подразумевает самостоятельную адаптацию агента к изменениям, происходящим в среде обитания (т.е. – «автообучение»), а также позволяет решить проблему поиска компромисса между изучением и применением [2] за счёт стохастического поиска в пространстве решений, где стратегия выбора между поиском новых и применением уже добытых знаний определяется в ходе эволюционного процесса.

Описанная проблема является специфической для обучения с подкреплением и в других видах обучения отсутствует. Она заключается в том, что для получения большего вознаграждения обучающейся системе нужно выполнять действия, которые уже вызвали поощрение в прошлом. Но при этом система должна обучаться новым таким действиям – получать новые знания, – а для этого необходимо также пробовать выполнять новые действия, которые ранее не выполнялись и многократно их повторять для определения степени надёжности связей между воспринимаемыми ситуациями, предпринимаемыми действиями и сигналом вознаграждения. В работе [2] указано, что данное противоречие «активно исследуется математиками уже в течение нескольких десятилетий» и названо одной из наиболее серьёзных проблем, которые возникают при применении обучения с подкреплением.

Таким образом, в рамках данной статьи под нейроэволюционным подкрепляющим обучением будем подразумевать эволюционный поиск такой структуры нейронной сети, управляющей агентом, которая обладала бы поведенческими качествами, достаточными для успешного решения поставленной задачи.

В качестве таковой для достижения целей данного исследования была выбрана задача распознавания текста, которую, в свою очередь, можно определить, как поиск такой

последовательности символов заданного алфавита, которая максимально соответствует входному изображению текстовой информации. В рамках описываемой модели, все возможные сочетания символов на изображении могут быть представлены в виде марковского процесса [2]. При этом семантика, от которой он абстрагирован, может быть проявлена в дальнейшем через осуществление собственного поведения системы, как результат интерпретации её входных данных.

Существующие сегодня подходы и методы классификации и распознавания образов базируются на статичном поведении системы, когда ей на вход подаётся образ, а ответной реакцией служит мгновенное значение выхода, однозначно интерпретируемое в номер одного из классов, к которому она его отнесла, и на которые ранее была обучена. При этом система не генерирует управляющих сигналов, что значительно упрощает применение к ней обучения с учителем, т.к. становится возможным определить точное значение выхода в ответ на конкретный стимул. Таким образом, обратная связь от среды обитания практически отсутствует. Системе предоставляется некоторый образ, и она реагирует на него каким-то конкретным значением своих выходов, а каждый отдельный акт её работы не имеет связи с предыдущими и последующими.

С одной стороны, описанная концепция значительно упрощает минимальную необходимую структуру нейронной сети, лежащую в основе модели, но с другой – при обучении и взаимодействии агента со средой отсутствует динамический аспект, когда поведение системы проявляется в виде интерактивного кибернетического процесса, что уменьшает степень её подобия с моделируемым естественным аналогом, и, предположительно, отрицательно влияет на общее качество получаемого результата.

Обучение с подкреплением позволяет устранить эту разницу, однако требует некоторой адаптации для применения в рамках концепции обучения с учителем.

Рассматривая существующие биологические аналоги в естественной среде с точки зрения имеющихся данных об их развитии и строении, можно определить в них некоторые базовые характеристики, которые могут

быть положены в основу проектирования. Среди них следует особо заметить однозначный нейросетевой характер структуры, эволюционную природу процесса формирования топологии связей между нейронами, а также подкрепляющий механизм обучения, при котором система обучается взаимодействию с некоторой окружающей средой.

Таким образом, можно предположить, что стохастическая модель естественного аналога системы распознавания может быть получена в результате эволюционного процесса и описана с точки зрения нейросетевого моделирования, совместно с подкрепляющим обучением.

Задачей текущего исследования является проверка следующей гипотезы: в рамках нейроэволюционного подкрепляющего обучения за ограниченное время возможно получить такую структуру агента, действующего в определённой цифровой среде обитания, которая наделяла бы его поведением, приспособленным к решению некоторой интеллектуальной задачи, характерной именно для данной среды обитания. В качестве такой задачи для проверки гипотезы было выбрано распознавание искажённых изображений коротких последовательностей текста. При этом изображения могут быть произвольного размера и искажёнными до той степени, которая не препятствует их распознаванию человеком.

Как правило, качество разрабатываемых систем распознавания оценивается значением соответствующей среднеквадратической ошибки её выходов, что характерно также и для эволюционных моделей [3]. Однако при обучении с подкреплением данная метрика не может быть объективно оценена, т.к. точно неизвестно заранее, какое именно поведение должна проявить система для распознавания конкретного стимула, и, в то же время, множество различных комбинаций действий могут предшествовать итоговому верному отклику системы.

Таким образом, чтобы оценить её качество при экспериментальной проверке гипотезы нужно определить и проанализировать следующие выходные динамические параметры модели, получаемые в результате итеративной работы эволюционного алгоритма:

- относительное скалярное значение полиномиальной функции взвешивания;

- общая точность определения характеристик текущего распознаваемого символа;
- относительная точность определения местоположения текущего распознаваемого символа;
- относительная точность определения размеров текущего распознаваемого символа;
- абсолютная точность определения количества символов на изображении;
- абсолютная точность распознавания символов;

Описание модели

Схема взаимодействия агента с окружающей средой в рамках концепции эволюционного подкрепляющего обучения изображена на рис. 1. На каждом дискретном временном шаге, которые составляют последовательность $t=0, 1, 2, \dots$, агенту предъявляется текущее описание состояния окружающей среды $s_t \in S$, где S – множество допустимых состояний, на основе которого он генерирует действие $a_t \in A(s_t)$, где $A(s_t)$ – множество возможных действий в состоянии s_t . В следующий момент времени $t + 1$, в ответ на предпринятые ранее действия агента, ему сообщается некоторое числовое значение вознаграждения $r_{t+1} \in R$, а также новое состояние окружающей среды s_{t+1} [2]. Вместе с тем, среда взаимодействует не с одним агентом, а с некоторой их популяцией, сообщая им на каждом временном шаге последовательности $h = tC$, где $C \in Z$, $C=const$, описания их внутренней структуры в виде генерируемого в результате работы генетического алгоритма генома $g_{nh} \in G$, где n – номер особи

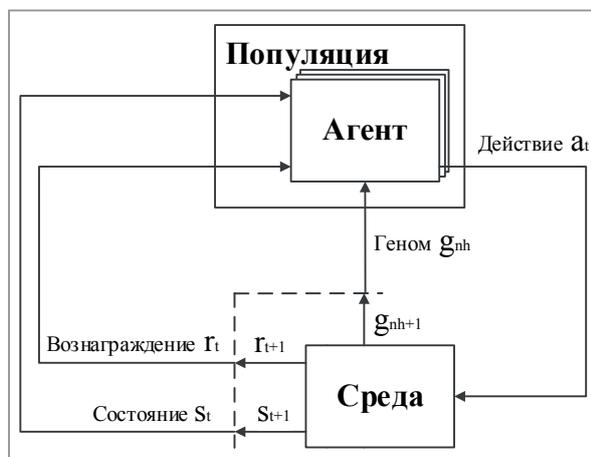


Рис. 1. Взаимосвязь «агент – окружающая среда» в эволюционном обучении с подкреплением

в популяции, а G – множество возможных описаний внутренней структуры агента.

Для минимизации размерности пространства признаков входного сигнала с целью упрощения общей структуры системы было применено абстрагирующее кодирование входных изображений в рамках концепции экстраполирующего обучения [4], при использовании которого информация, содержащаяся в одной, уже обученной, нейронной сети, может быть использована для ускорения и улучшения качества классификации, а также распознавания образов, принадлежащих к неизвестным ей классам, с помощью другой нейронной сети. Однако в общем случае здесь может применяться любое кодирующее преобразование, уменьшающее размерность признакового пространства входа без существенной потери информации, что позволяет значительно упростить архитектуру сети и, в результате, ускорить её работу. Описанная в указанной работе структура модели позволяет добиться регулярно достигаемой точности распознавания «интерполиатора» [4] более 99% в серии запусков на обучающей базе изображений рукописных символов *MNIST* [5], некоторые изображения из которой показаны на рис. 2.

Структура связей нейронной сети, лежащей в основе устройства управления системы, представлена на рис. 3. В нижней его части изображена схема «интерполирующей» подсети, а в верхней – непосредственно эволюционирующий нервный узел (ганглий). Он представляет собой множество связанных друг с другом искусственных нервных клеток и в вышеописанной концепции обучения с подкреплением

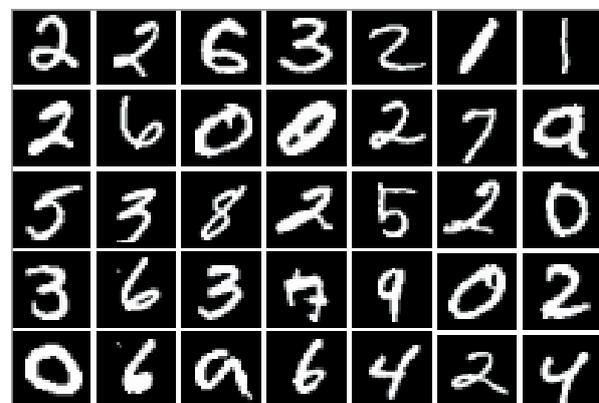


Рис.2. Примеры изображений рукописных символов из базы MNIST

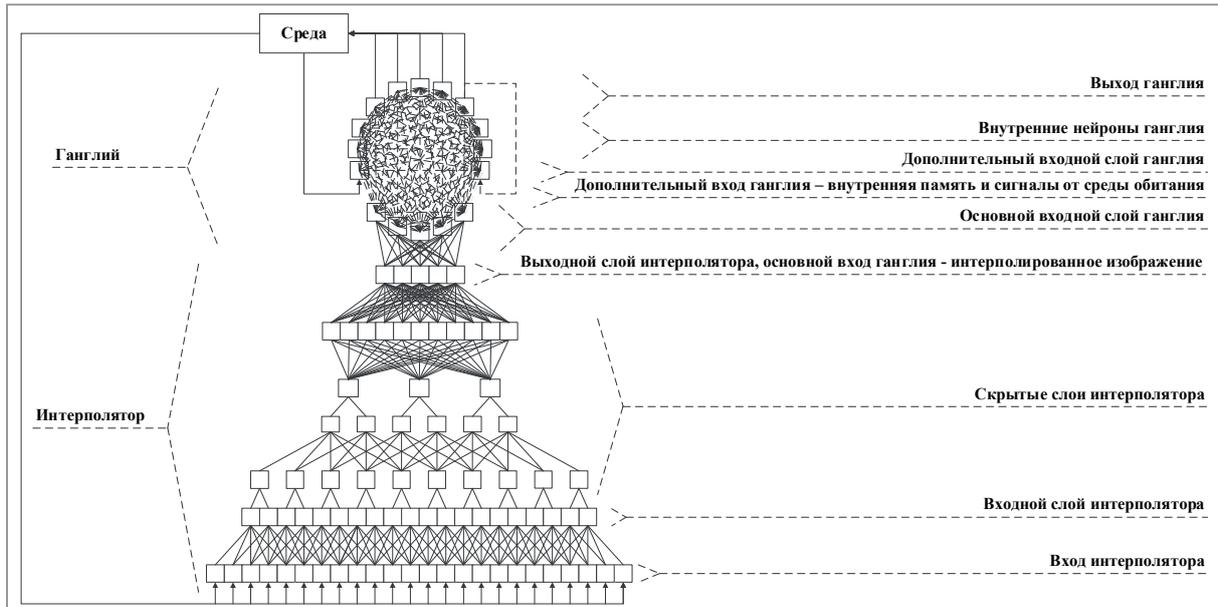


Рис. 3. Схема нейронной сети, лежащей в основе агента

играет роль агента. Нейроны, изображённые в нижней части ганглия, являются входными и связаны, кроме других нейронов ганглия, также с выходами «интерполиатора». Нейроны средней части являются промежуточными и связаны только с нейронами самого ганглия. Нейроны, изображённые в верхней части нервного узла, являются выходными и генерируют множество двоичных сигналов, интерпретируемых средой обитания в конкретное воздействие, определяя параметры области восприятия и характеристики текущего действия всей системы распознавания.

Формирование информационного ответа окружающей средой может производиться, например, как: масштабированием/перемещением текущей области восприятия изображения, передачей данных о работе системы на предыдущих этапах процесса распознавания (которые являются, таким образом, её внутренней памятью), а также сообщением некоторых качественных характеристик осуществлённого воздействия, необходимых для определения значения r_{t+1} .

Формирование подкрепляющих сигналов r_t производится на основе эволюционного механизма, где в качестве хромосомы понимаются ассоциированное с конкретным решением задачи распознавания множество связей между нейронами ганглия и числовые значения весовых коэффициентов, определяющих силы этих связей. Под конкретной особью в данной работе понимается некий механизм (протокол)

взаимодействия агента с внешней средой согласно правилам, описываемым ассоциированной с ней хромосомой. С точки зрения обучения с подкреплением это понятие совпадает с агентом [2], который взаимодействует с внешней средой.

Для разработки интерполирующей нейронной сети использовалось средство глубокого обучения *Caffe* [6]. Данный фреймворк применяется для разработки и обучения нейронных сетей свёрточного типа на базе *GPU* методом обратного распространения ошибки с использованием пакетного обучения и алгоритма стохастического градиентного спуска, что позволяет существенно ускорить процесс обучения.

В качестве эволюционного метода оптимизации хромосом, определяющего структуру ганглия, был выбран генетический алгоритм [3], основанный на эволюционных процессах и механизмах, имеющих место в живой природе. Выражения для операторов кроссинговера и мутации представлены в формулах 1 и 2, соответственно.

$$C_{n+1} = A_n + \xi \cdot (B_n - A_n), \quad (1)$$

где C_{n+1} – потомок в поколении $n+1$, A_n и B_n – родители в поколении n , $\xi \in (0..1)$ – случайная величина.

$$M_n = A_n + R_t(2 \cdot \xi - 1), \quad (2)$$

где M_n – мутировавшая хромосома, A_n – мутирующая хромосома, R_t – радиус мутации.

Суть работы эволюционного алгоритма с точки зрения данного исследования может быть описана следующим образом: на начальном этапе определяется некоторое количество особей, для которых структура связей и их значения активируются случайным образом. Затем в процессе работы алгоритма происходит регулярная оценка результатов функционирования особей популяции с точки зрения качества их поведения и отбор некоторого количества для дальнейшего функционирования, а также создания на их основе новых особей, в то время как остальные уничтожаются; после чего процесс продолжается заново. В качестве функции взвешивания хромосом использовалось выражение, описанное в формуле 3.

$$F = \sum_{i=1}^n X_i b_i, \quad (3)$$

где множество $X_1, X_2, \dots, X_n \in [0..1]$ означает частные качественные оценки, некоторые из которых определены в разделе «Постановка задачи», а $b_1, b_2, \dots, b_n \in \mathbb{Z}$ являются их коэффициентами, определяющими веса указанных оценок в общей функции взвешивания, которые подбираются эмпирически. Наиболее важной из описанных метрик является абсолютная посимвольная точность, вычисляемая по формуле 4.

$$A = \frac{N}{M}, \quad (4)$$

где $N \in \mathbb{Z}, N \geq 0$ – количество успешно распознанных символов, $M \in \mathbb{Z}, M > 0, M \geq N$ – общее количество символов во всех текстах выборки.

В некоторых экспериментах для стабилизации радиуса мутации был применён принцип отжига, согласно формуле 5.

$$R_t = \frac{R_0}{t}, \quad (5)$$

где R_0 – базовый радиус мутации, t – время.

Для задания всех входных и выходных числовых констант нервного узла, кроме номера класса распознаваемого символа, в данной работе применялось конфигурационное кодирование. Это также позволяет дополнительно минимизировать итоговую сложность нейронной сети. При определении номера класса распознаваемого символа использовалось позиционное кодирование ввиду того, что оно несколько точнее конфигурационного [7], а ошибка базовой подсистемы классификации изображений оказывает значительное влияние на общий результат распознавания.

Результаты экспериментов

В процессе разработки и настройки системы для исследования сформулированной гипотезы была проведена серия из нескольких сотен запусков модели с различными комбинациями параметров эволюционного алгоритма, форм и типов взвешивающих метрик, а также характеристик разрабатываемой нейронной сети. Для проведения экспериментов была использована база «*The Street View House Numbers (SVHN) Dataset*» [8], содержащая искажённые изображения сверхкороткого текста



Рис. 4. Некоторые изображения из базы SVHN

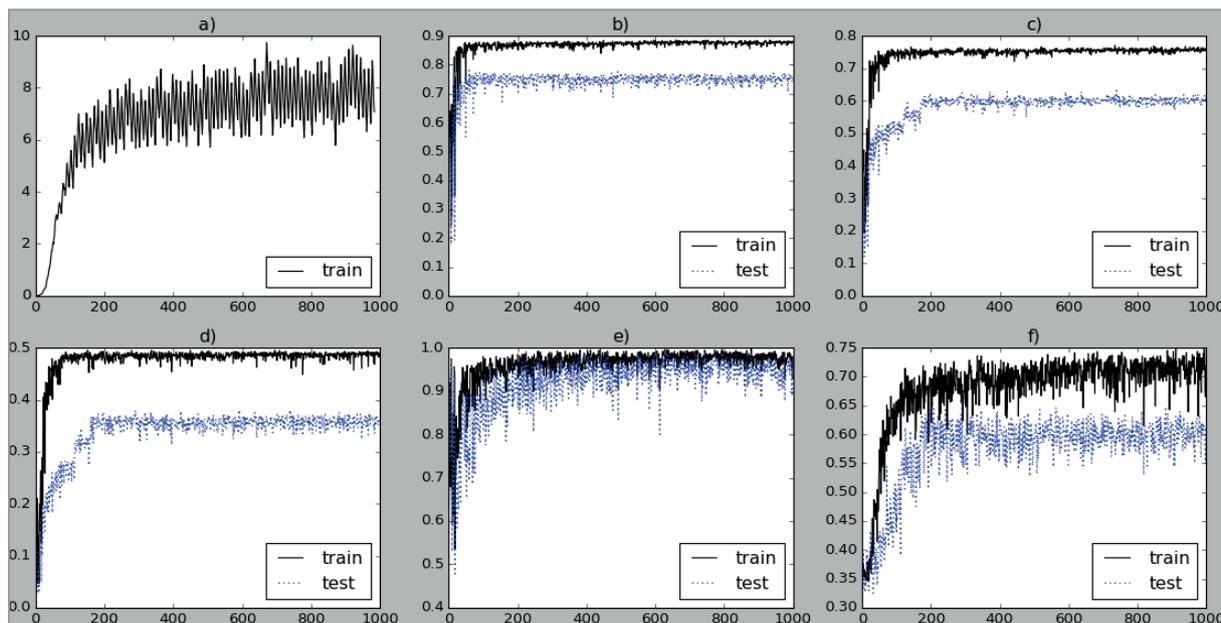


Рис. 5. Результаты обучения модели:

- a) сглаженное значение общей функции взвешивания;
- b) точность определения позиции текущего символа;
- c) точность определения размеров текущего символа;
- d) общая точность определения параметров области, содержащей текущий символ;
- e) точность определения количества символов на изображении;
- f) абсолютная посимвольная точность

длиной от 1-го до 4-х символов. На рис. 4 показаны примеры изображений, которые содержатся в ее обучающей и тестирующей выборках.

На рис. 5 показаны итоговые графики улучшения исследуемых выходных характеристик, полученных в результате функционирования эволюционного процесса настройки системы, характерных для данной серии экспериментов. Значения приведены по наилучшей особи в популяции.

Данные результаты обучения модели получены при следующих параметрах эволюционного процесса и физического окружения: количество особей в популяции – 200–2000, количество итераций обучения – 10 000, время эволюционного обучения – 42 ч., время однократного обучения интерполятора методом обратного распространения ошибки – 4 часа. Эксперименты проводились на вычислительной системе с CPU – Intel Core i7, ОЗУ 12 Гб, GPU – NVIDIA GeForce GT 650M.

При разных значениях параметров эволюционного процесса и разрабатываемой нейронной сети имела место существенная разница в скорости схождения функций оценки качества различных аспектов поведения

системы распознавания, а также в достигаемых значениях их экстремумов. Однако практически во всех запусках наблюдалось устойчивое улучшение значений указанных функций взвешивания по траекториям, визуально сходным с логарифмическими (см. рис. 5).

Заключение

Как видно на графиках, в результате эволюционного процесса адаптации системы к её среде обитания наблюдается устойчивое последовательное улучшение взвешивающих метрик, при этом абсолютная посимвольная точность, вычисляемая по формуле 5, равная 0.5 (это значит, что обученной к этому моменту системой было успешно распознано 50% всех представленных символов на подаваемых изображениях), как правило, была достигнута не более чем через 100 эпох работы эволюционного алгоритма, – около 4 часов процесса обучения, что составляет примерно 0.1 от всего времени обучения, – и для тренировочной, и для тестовой выборок, а остальные 0.9 части времени работы ушли на преодоление следующих 0.25 точности для тренировочной выборки.

В различных опытах, даже при одном и том же значении всех параметров системы и эволюционного процесса формирования её структуры наблюдался значительный разброс экстремальных достигаемых значений функции ценности, а также сопутствующих ей параметров, и, например, для абсолютно-го значения посимвольной точности составил около 20%.

Максимальная достигнутая посимвольная точность, в описанной серии экспериментов составила около 0.79 для тренировочной и около 0.71 для тестовой выборки.

Таким образом, результаты, полученные в ходе обучения системы, позволяют утверждать о подтверждении выдвинутой гипотезы, а полученный в рамках проведения текущего исследования способ нейроэволюционного подкрепляющего обучения нейронных сетей, вследствие своей универсальности, может быть применён с соответствующими адаптациями, наравне с проблемой распознавания текста, также к максимально широкому спектру других типов задач искусственного интеллекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Хижняков, Ю. Н.** Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени / Ю. Н. Хижняков. – Пермь: ПНИПУ, 2013. – 160с.
2. **Саттон, Р. С.** Обучение с подкреплением / Р. С. Саттон, Э. Г. Барто – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2017. – 399с.
3. **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский – М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 384с.
4. **Бурый, Я. А.** Экстраполирующее обучение нейронных сетей. Информатика. Том 16, № 1 (2019) / Я. А. Бурый, Д. И. Самаль – М.: Информатика, 2019. – 86–92с.
5. База изображений THE MNIST DATABASE of handwritten digits – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/>. – Дата доступа: 14.08.2018.
6. Официальный сайт Caffe (GitHub) – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://caffe.berkeleyvision.org>. Дата доступа: 14.08.2018.
7. **Бурый, Я. А.** Применение конфигурационного кодирования входного сигнала в нейронных сетях свёртки для распознавания рукописных символов / Я. А. Бурый, Д. А. Самаль – М.: БГУИР, BigDATA, 2019. – 366–371с.
8. База изображений The Street View House Numbers (SVHN) Dataset – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ufdl.stanford.edu/housenumbers>. – Дата доступа: 14.08.2018.
9. **Хайкин, С.** Нейронные сети. Полный курс / С. Хайкин. – М., СПб., Киев: Вильямс, 2006. – 1104с.
10. **Плотников, А. Д.** Математическое программирование / А. Д. Плотников – Минск: Новое знание, 2007. – 171с
11. **Николенко, С.** Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей / С. Николенко, А. Кадури, Е. Архангельская – СПб.: Питер, 2018. – 480с.

REFERENCES

1. **Hizhnjakov, J. N.** Algorithms of fuzzy, neural and neural-fuzzy control in real-time systems / J. N. Hizhnjakov. – Perm: PNIPU, 2013. – 160p.
2. **Sutton, R. S.** Reinforcement Learning / R. S. Sutton, A. G Barto. – М.: BINOM. 2017. – 399p.
3. **Rutkovskaja, D.** Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems / D. Rutkovskaja, M. Pilin'skij, L. Rutkovskij – М.: Gorjachaja linija – Telekom, 2013. – 384p.
4. **Bury, Y.** Extrapolating training of neural networks. Informatics. Num 16, № 1 (2019) / Y. A. Bury, D. I. Samal – М.: Informatics, 2019. – 86–92p.
5. Images dataset THE MNIST DATABASE of handwritten digits. Access mode: <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/>. Access date: 14.08.2019.
6. Official site Caffe (GitHub). Access mode: <http://caffe.berkeleyvision.org>. Access date: 14.08.2019.
7. **Bury, Y.** Application of configuration coding of the input signal in convolution neural networks for recognition of handwritten characters / Y. Buryi, D. Samal – М.: BSUIR, BigDATA, 2019. – 366–371p.
8. The Street View House Numbers (SVHN) Dataset – [Electronic resource]. – Access mode: <http://ufdl.stanford.edu/housenumbers>. Access date: 14.08.2019.
9. **Hajkin, S.** Neural networks. Full course / S. Hajkin. – М., SPb., Kiev: Vil'jams, 2006. – 1104p.
10. **Plotnikov, A. D.** Mathematical programming / A. D. Plotnikov – Минск: Novoe znanie, 2007. – 171p
11. **Nikolenko, S.** Deep learning. Immersion in the world of neural networks/ S. Nikolenko, A. Kadurin, E. Arhangelskaya – SPb.: Piter Publ., 2018. – 480p.

Поступила
05.09.2021

После доработки
01.11.2021

Принята к печати
01.12.2021

Y. A. BURY, D. I. SAMAL

NEUROEVOLUTIONARY REINFORCING LEARNING OF NEURAL NETWORKS

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

The article presents the results of combining 4 different types of neural network learning: evolutionary, reinforcing, deep and extrapolating. The last two are used as the primary method for reducing the dimension of the input signal of the system and simplifying the process of its training in terms of computational complexity.

In the presented work, the neural network structure of the control device of the modeled system is formed in the course of the evolutionary process, taking into account the currently known structural and developmental features of self-learning systems that take place in living nature. This method of constructing it makes it possible to bypass the specific limitations of models created on the basis of recombination of already known topologies of neural networks.

Keywords: *neural networks, convolution neural network, neuroevolution, evolutionary algorithms, genetic algorithm, image recognition, character recognition, text recognition, neural network training, deep learning, reinforcement learning.*



Бурый Ярослав Анатольевич, ассистент кафедры электронных вычислительных машин БГУИР, аспирант кафедры электронных вычислительных машин БГУИР.

Yaraslau A. Bury, Assistant of Electronic Computing Machines Department BSUIR, Post-graduate student of Electronic Computing Machines Department BSUIR.

Email: edidici@tut.by



Самаль Дмитрий Иванович, доцент кафедры программного обеспечения информационных технологий БГУИР, доцент кафедры программной инженерии БГТУ, кандидат технических наук.

Dmitry I. Samal, Associate Professor of the Software for Information Technologies Department BSUIR, Associate Professor of the Software Engineering Department BSTU Ph.D.

Email: samal@bsuir.by

В. В. СТАРОВОЙТОВ¹, Ю. И. ГОЛУБ¹, М. М. ЛУКАШЕВИЧ²

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СЕТЧАТКИ

¹ Государственное научное учреждение «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»

² Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Диабетическая ретинопатия (ДР) – это болезнь, вызванная осложнениями сахарного диабета. Она начинается бессимптомно и может закончиться слепотой. Для ее обнаружения медики используют специальные фотокамеры, позволяющие регистрировать изображения сетчатки глаза в видимом диапазоне электромагнитного спектра. На этих изображениях видны признаки осложнений, по которым определяется наличие ДР и ее стадия. Исследователи всего мира разрабатывают системы автоматизированного анализа изображений сетчатки. В настоящее время уровень точности классификации заболеваний, вызванных ДР, системами на базе машинного обучения сопоставим с уровнем квалифицированных медиков.

В статье показано разнообразие вариантов представления сетчатки на цифровых изображениях. Поставлена задача разработки универсального подхода к оценке качества изображения сетчатки, полученного произвольной камерой. Она решается в первом блоке любой автоматизированной системы анализа изображений сетчатки. Процедура оценки качества выполняется в несколько этапов. На первом этапе необходимо выполнить бинаризацию исходного изображения и построить маску сетчатки. Такая маска индивидуальна для каждого изображения даже среди изображений, зарегистрированных одной камерой. Для этого предлагается новый универсальный алгоритм бинаризации изображения сетчатки. Анализируя построенную маску, можно определить и удалить изображения-выбросы, на которых представлена не сетчатка, а другие объекты. Далее решается задача оценки качества изображений в отсутствие эталона и их классификация на два класса: удовлетворительные и неудовлетворительные для дальнейшего анализа. Поэтапно оценивается контраст, резкость и возможность выделения сосудистой системы изображения сетчатки. Показано, что задача оценки качества произвольного изображения сетчатки может быть решена.

Эксперименты выполнялись на разнообразных изображениях из доступных баз данных.

Ключевые слова: диабетическая ретинопатия, сетчатка, цифровое изображение, оценка качества изображений, распределение Вейбулла.

Введение

Сахарный диабет – это группа метаболических заболеваний, которые вызывает повышенный уровень сахара в крови. В последние годы диабет стал одной из причин смерти людей. По данным Всемирной организации здравоохранения 463 миллиона человек в мире жили с диабетом, и около 1,5 миллиона из них умерли от диабета в 2019 году [1]. Диабетическая ретинопатия (ДР) – это одно из осложнений у больных сахарным диабетом. В 2019 году во всем мире 93 миллиона человек жили с диабетической ретинопатией [2], которая в последней стадии заболевания ведет к слепоте. Заболевание начинается и протекает бессимптомно. Оно сопровождается

появлением микроаневризм, кровоизлияний и изменений кровеносной системы сетчатки глазного дна. Данные изменения можно обнаружить на изображениях сетчатки, сделанных специальными фундус-камерами (рис. 1). Цифровое изображение сетчатки глазного дна представляет собой проекцию на плоскость сферообразной поверхности сетчатки, попавшей в конусообразный пространственный угол зрения камеры. Эти углы называются полем зрения (от field of view или FOV), поэтому на матрице изображения часть, соответствующую собственно сетчатке, будем далее называть областью FOV. Эти области различны на изображениях, сделанных разными моделями камер, а углы чаще всего составляют 30, 40, 45 и 50 пространственных градусов. Как правило,

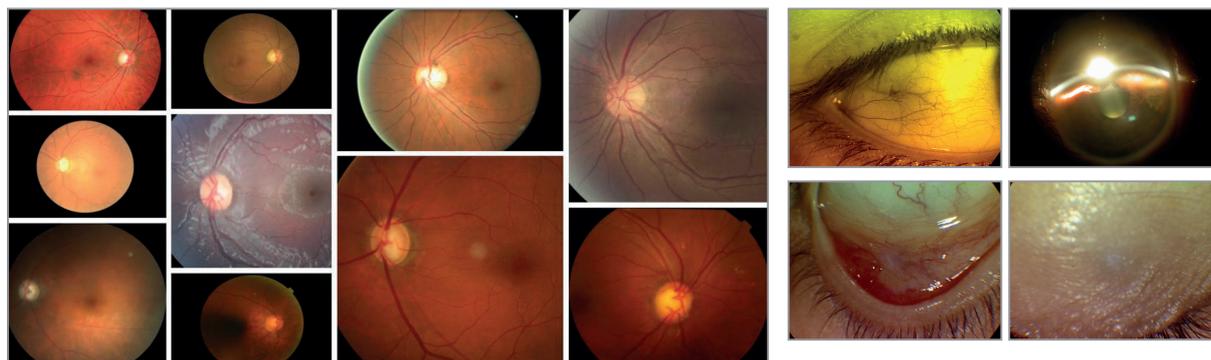


Рис. 1. Варианты представления сетчатки в виде цифрового изображения, справа – примеры изображений-выбросов, которые нельзя использовать для анализа сетчатки

сетчатка освещается белым цветом, и изображение регистрируется в видимом диапазоне спектра ПЗС матрицей. Цветное изображение формируется методом Байера с помощью светофильтров, поэтому сенсоров, принимающих зеленый цвет в два раза больше чем, принимающих красный и синий цвета. Волны зеленого диапазона хорошо поглощаются тканями красного цвета и порождают наиболее контрастное изображение сетчатки в этом диапазоне спектра. Цветное изображение формируется путем интерполяции значений полутонов трех диапазонов. В нем красный канал является самым ярким, а зеленый – самый контрастный.

Зачем нужна автоматизированная диагностика изображений сетчатки? Во-первых, медицинское учреждение может купить фундус-камеру, но не иметь подготовленного специалиста для диагностики осложнений по изображениям, тогда их можно пересылать для анализа в другой медицинский центр. Во-вторых, многочисленные исследования показывают, что в настоящее время компьютерные системы исследования изображений сетчатки не уступают квалифицированным экспертам по точности диагностики. В-третьих, разные специалисты выделяют разное количество признаков на одном и том же изображении. Например, в статье [3] сравнивали точность выявления отдельных признаков на изображениях сетчатки экспертами и компьютером. У большинства офтальмологов наиболее распространенной ошибкой был пропуск микроаневризм на почти 10% изображений, а это основной признак ДР (первая стадия – это наличие не менее 20 микроаневризм); неверно классифицированные кровотечения и др. Нейросетевой алгоритм определения стадии

ДР продемонстрировал результаты на уровне сертифицированных американских офтальмологов и специалистов по сетчатке. Это говорит о возможности создания автоматизированных систем поддержки принятия решения врачом-офтальмологом для анализа цифровых изображений сетчатки на базе машинного обучения.

При автоматизированной диагностике ДР используются цветные изображения глазного дна. ПЗС матрицы камер имеют разные размеры и варианты размещения проекции области FOV на матрицу (см. рис. 1 и [4]). На некоторых изображениях область FOV составляет менее 50% площади, а на других более 95%. Размеры цифровых изображений могут отличаться на порядок. Их освещенность, цвет и качество отображения сетчатки разными камерами, существенно отличаются друг от друга. Недостаточное качество изображений, вызванное фоновым шумом, неравномерным освещением, низким контрастом и т.д., может повлиять на точность выявления признаков и диагностику заболеваний. Некоторые исследователи отмечают, что порядка 10–20% цифровых изображений сетчатки имеют низкое качество. Кроме того, в повседневной практике неизбежны ситуации, когда на снимке представлена не сетчатка, а нечто другое, попавшее в объектив, так называемые изображения-выбросы (рис. 1, б).

Оценка качества изображения сетчатки является актуальной задачей и решается на первом этапе в автоматизированных системах анализа изображений сетчатки. Она позволяет отбросить изображения не позволяющие выполнить корректную диагностику заболеваний.

В результате анализа литературы [5–7] и выполнения ряда экспериментов был сделан вывод

о невозможности разработки единой оценки для анализа качества изображений сетчатки. Предлагается следующая схема оценки качества изображений сетчатки: поэтапно разделять изображения на три класса: выбросы, т.е. изображения, сделанные фундус-камерой, но не содержащие области сетчатки (см. Рис. 1б), неудовлетворительные и удовлетворительные. Процедура оценки качества изображений реализуется в виде дерева принятия решений. Она отсеивает неудовлетворительные изображения поэтапно. Критериев хороших изображений сетчатки нет. Из общедоступных баз изображений сетчатки только одна база HRF имеет по 15 изображений каждого из трех указанных классов [8], что мало для выполнения серьезных статистических исследований. Неформально к классу «удовлетворительные» изображения следует относить такие, которые позволяют корректно оценить степень заболевания по изображению сетчатки. Все остальные необходимо отбрасывать. Если качество изображения оценивается на этапе его регистрации, то в случае неудовлетворительной оценки, изображение может быть оперативно перерегистрировано.

Возникает задача разработки универсальной процедуры автоматического анализа качества изображений сетчатки, полученных произвольной фундус-камерой. Данная задача ставится впервые, т.к. большинство исследователей ограничивает оценку качества изображениями одной или нескольких небольших баз данных. Задача решается в несколько этапов. На первом необходимо отсеять изображения-«выбросы», неизбежно возникающие в процессе регистрации. Затем удаляются изображения, для которых невозможно сегментировать область сетчатки FOV на матрице изображения в силу плохой освещенности сетчатки. Далее отбрасываются слишком темные и слишком светлые, т.е. определенно неконтрастные изображения. Качество оставшихся изображений оценивается контрастом и резкостью в области FOV.

Любая визуальная оценка качества изображений человеком будет субъективна, что затрудняет объективную оценку разрабатываемых алгоритмов. Отметим, что доступные базы изображений сетчатки содержат данные о степени заболевания, и предполагается, что качество этих изображений приемлемо для диагностики.

Построение маски FOV

На сегодняшний день известно 55 доступных баз изображений сетчатки [9]. Однако исследования по анализу изображений глазного дна выполняют чаще всего на одной из доступных баз, реже – на двух-трех. Большинство из доступных баз содержит небольшое число изображений (табл. 1). Пиксели фона за пределами области FOV имеют темный, но не всегда строго черный цвет с нулевым значением яркости. Они не несут полезной информации, поэтому их необходимо отбрасывать на этапе анализа изображений сетчатки. Это выполняется с помощью бинарной маски, описывающей область FOV. Некоторые из них, такие как DRIVE, HRF, DIARETDB0 и DIARETDB1, содержат маски FOV для каждого изображения, но большие базы (более 1000 изображений) не содержат таких масок.

Цифровые изображения, сделанные разными фундус-камерами, отличаются размером и расположением проекции области сетчатки на матрице. Однако следует отметить, что маски FOV изображений разных глаз, сделанные одной фундус-камерой, также будут незначительно отличаться из-за условий съемки. Примеры параметров маски FOV на изображениях размером 5184x3465 пикселей, снятых одной и той же камерой из базы HRF с углом FOV = 45°, представлены в табл. 2. Возможно, это объясняется анатомическими особенностями разных людей и положением головы во время съемки, поскольку изображение сетчатки является проекцией на плоскость сферообразной поверхности глазного яблока. Из этого следует, что маску FOV необходимо строить для каждого изображения индивидуально. Отметим, что визуально все маски этой базы идентичны.

Бинарная маска FOV разделяет пиксели на две области: изображение сетчатки глазного дна и фон. В большинстве работ по исследованию изображений глазного дна авторы либо используют маски FOV прилагаемые к базам данных, либо генерируют маски для каждого изображения. Удалось найти всего несколько публикаций, в которых авторы генерировали собственные маски FOV [2, 3, 5, 7, 8, 10].

В работе [7] сначала вычисляются модули градиента красного канала исходного изображения. Затем к градиентному изображению

Т а б л и ц а 1. Описание некоторых баз изображений сетчатки

База	Угол FOV	Разрешение, пк	Число изображений	Наличие бинарных масок	Особенности
MESSIDOR	45	1140×960, 2240×1488, 2304×1536	1200	нет	для каждого изображения указаны: степень ретинопатии
CHASE_DB1	30	1280×960	28	кровеносные сосуды	
STARE	35	700×605	402	кровеносные сосуды	список диагнозов для каждого изображения
DRIVE	45	565×584	40	FOV, кровеносные сосуды	33 здоровых и 7 больных
DRIMDB0	60	760×570	216	нет	3 класса качества изображений: хорошие, плохие, выбросы
IDRiD	50	4288×2848	516	маски для 5 типов признаков	база разделена на три части: сегментация, классификация болезней, локализация
DIARETDB1	30	3504×2336, 5184×3456	89	микроаневризмы, мягкие и твердые экссудаты, кровоотечения	
High-Resolution Fundus (HRF)	45	3504×2336	45	FOV, кровеносные сосуды	2 класса качества изображений
DDR	45	разное от 1515×1275 до 5184×3456	13673	микроаневризмы, мягкие и твердые экссудаты, кровоотечения	42 типа камер
Kaggle	разное	разное	разное в разных версиях	нет	есть ошибки в экспертной классификации

Т а б л и ц а 2. Примеры параметров маски FOV на изображениях размером 5184x3465, снятых одной и той же камерой из базы HRF, FOV = 45°

Имя изображения	Координаты центра FOV	Площадь области FOV	Наш порог бинаризации	Порог Оцу
1_bad	1759,2; 2592,1	8357881	40	48
2_good	1759,2; 2592,1	8356419	37	45
2_bad	1759,7; 2592,6	8365202	10	24
2_good	1758,8; 2592,7	8363587	5	20
4_bad	1758,7; 2593,5	8360941	33	44
4_good	1758,4; 2591,9	8365235	40	46

применяются несколько имеющихся масок FOV и выбирается наиболее подходящая. Маски-шаблоны заранее отсегментированы вручную. При необходимости создается новая маска и добавляется к сохраненным ранее. Таким образом, для выбора маски используется метод сравнения с несколькими эталонами масок, которые строятся вручную.

Тер Хаар [10] создавал маску FOV путем бинаризации красного канала изображения сетчатки с использованием эмпирически подобранного порога, затем бинарное изображение обрабатывалось морфологическими операторами отмыкания, замыкания и эрозии с помощью структурирующего элемента квадратной формы размером 3×3 элемента. В статье [11] авторы генерировали бинарную маску FOV путем свертки красного канала с гауссовским фильтром низких частот, после чего

применялся метод бинаризации Оцу [12]. Эти методы некорректно работают на темных изображениях (рис. 2).

В работе [5] авторы использовали стандартное отклонение σ и среднее значение яркости пикселей, расположенных вне области FOV для трех цветовых диапазонов (R, G и B). Для каждого диапазона вычислялось пороговое значение равное средней яркости плюс 4σ . Формула была подобрана эмпирически так, чтобы только пиксели, значения которых превышают порог, попадали в область FOV. Затем с помощью логических операций результаты бинаризации всех трех диапазонов объединялись для формирования единой маски FOV. Однако для вычислений требуется знать, как выделить пиксели, не попадающие в область FOV, т.е. требуется наличие точной маски для каждого изображения при сборе

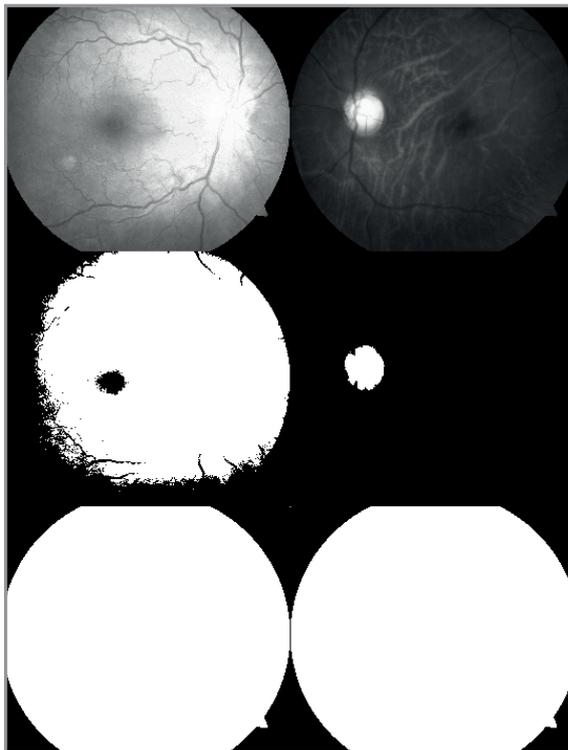


Рис. 2. Примеры красных каналов изображений из базы HRF и их бинарные маски FOV, построенные методом Отсу (средний ряд) и предлагаемым методом (нижний ряд). Корреляция масок нижнего ряда равна 0.999997

статистических параметров. В реальных системах анализа изображений сетчатки таких масок нет, а статистика изображений, формируемых разными камерами, будет существенно отличаться.

В статье [4] выполнено сравнение пяти методов генерации масок. Сравнительная оценка методов проводится с использованием доступной базы DRIVE, содержащей 40 изображений сетчатки, выполненных одной камерой, и 40 построенных для них индивидуальных бинарных масок. Отметим, что границы области FOV достаточно хорошо выделяются на всех изображениях этой базы.

Метод, описанный в работе [5], превзошел другие методы при сравнении сгенерированных масок с масками, хранящимися в базе. Сравнение выполнялось функцией SSIM, т.е. фактически вычислялась корреляция двух бинарных масок. Чуть менее точным оказался метод бинаризации Отсу, примененный к логарифмически преобразованной матрице яркостей. Остальные методы показали посредственную производительность и могут дать приемлемые результаты

только при тестировании на хорошо освещенных изображениях.

Все описанные подходы эмпирические. Они не позволяют построить корректную маску в случае изображения «выброса», т.е. когда камера регистрирует изображение не сетчатки, а другого объекта (рис. 1, б).

Авторами статьи [13] была собрана база изображений 22-х вариантов регистрации (в открытом доступе ее нет). В статье описан наиболее универсальный метод построения маски FOV для изображений разных камер. Для этого использовался детектор края Кэнни, затем с помощью оператора Хаффа строился круг, который и определял маску. Однако на рис. 1, а имеются примеры изображений, для которых данный способ построения маски неприемлем, т.к. площадь фона очень мала и граница, разделяющая область FOV и фон, также мала. Такой метод построения маски недостаточно универсален.

Оценка качества области FOV

В статье [13] изображения сетчатки делятся по качеству на три класса: «принять», «отклонить», «неопределенный». Разделение выполняли 3 эксперта. Третий класс был отброшен, а для исследований из 4372 изображений была отобрана 1000 изображений первых двух классов. Отметим, что некоторые изображения из класса «отклонить» визуально вполне пригодны для диагностики некоторых заболеваний (рисунок 3, а, в, д, е). Качество отобранных изображений в [13] оценивались по параметрам освещенности, натуральности (в основном контраста) и расположения оптического диска в определенном месте области FOV. Цветное изображение преобразовывалось в представление YUV, а для оценки качества использовалась компонента Y. Пиксели, попавшие в область FOV, оценивались по 6 критериям. В частности, изображение считалось нормально освещенным, если менее 3% пикселей имели яркость $Y < 50$ и более 50% – яркость $Y < 240$ без дополнительной обработки изображения.

В результате изображения были разделены экспертами на 546 удовлетворительных и 454 неудовлетворительных, 385 изображений из 1000 имели неудовлетворительную

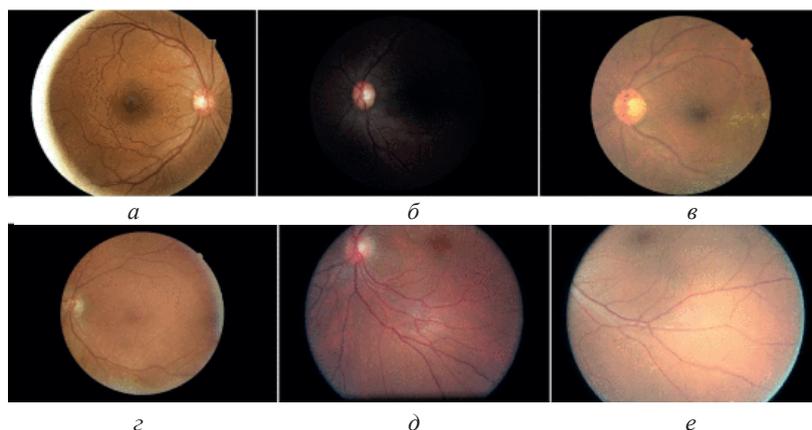


Рис. 3. Примеры изображений из класса «отклонить» [13]

натуральность. Фактически из исходного множества только у 10,38% изображений было определено удовлетворительное качество. Для реальных приложений это означает, что 9 из 10 изображений требуют повторного фотографирования, что неприемлемо для скрининга пациентов на практике.

В [8] предложен классификатор качества изображения глазного дна посредством анализа освещенности, естественности и структуры, который использует три эффективных вторичных индекса, вычисляемых из 5-мерного набора признаков, и различные методы классификации для определения рекомендательных индексов изображений глазного дна для дальнейшей диагностики. Создана база данных изображений глазного дна, включающая классы «принять», «отклонить», на основе определения освещенности, естественности и структуры изображения. Модель авторов показала чувствительность 94,69%, специфичность 92,29% и точность 93,60% при классификации изображений глазного дна. В ходе экспериментов авторы отобрали 4372 изображения глазного дна из базы EyePACS [14], которая предоставляется Калифорнийским фондом здравоохранения. Эти изображения имеют 22 варианта разрешения. Их можно разделить на три основных класса: «принять», «отклонить», и «неопределенный». В экспериментах использованы только изображения с категориями качества «принять», «отклонить», а класс «неопределенный» исключен, поскольку у экспертов могут быть противоречивые оценки, если эта категория качества изображений четко не определена. В статье [8] основное внимание уделяется диабетической

ретинопатии и оценка качества исходных данных основана на трех показателях: однородная освещенность, естественность (контраст, четкая структура кровеносных сосудов) и структура изображения (наличие оптического диска в определенной области изображения), хотя размытие или низкая контрастность также могут влиять на результаты классификации ДР.

Предлагаемый подход к оценке качества изображений сетчатки

Авторы данной статьи обобщив результаты описанных выше исследований, предлагают следующий подход к оценке качества изображений сетчатки, состоящий из нескольких этапов последовательного анализа изображения. Для построения маски FOV используется красный канал изображения сетчатки, а для вычисления локальных оценок качества – зеленый канал.

Этап 1. Выполнить анализ качества изображения сетчатки на уровне маски FOV

Для каждого типа камеры строится эталонная маска FOV путем бинаризации изображения визуального хорошего качества. Эту маску можно записать и идентифицировать по размерам исходного цифрового изображения, которое формирует камера. Например, при разрешении 1140×960 пикселей, маске можно дать имя 1140x960. При обработке очередного изображения строится его маска FOV (алгоритм описан ниже) и загружается эталонная маска, определяемая размером изображения. Вычисляется коэффициент корреляции между эталонной маской и маской, построенной для



Рис. 4. Изображение «выброс» и построенная для него маска

анализируемого изображения. Если он менее 0,95, считаем, что маска построена некорректно и изображение не следует использовать для анализа заболеваний, т.к. оно неудовлетворительного качества или представляет собой «выброс» (рис. 4).

На этом этапе отсеиваются изображения «выбросы», для которых невозможно корректно построить маску FOV. Этот класс настолько разнообразен, что оценки контраста, освещения и т.п. не позволяют однозначно идентифицировать относящиеся к нему объекты. Дополнительно можно отбросить некачественные изображения, определяемые простыми эмпирическими тестами, подобно описанным выше из работы [13].

Алгоритм построения маски FOV

Шаг 1. Загрузить цветное изображение сетчатки. Извлечь матрицу значений красного канала R как самого яркого.

Шаг 2. Вычислить минимальное R_{\min} , среднее R_{me} и медианное R_{med} значения яркости канала R .

Шаг 3. Если более 50% изображения сетчатки занимает темный фон, тогда:

если $R_{\text{med}} < T_1$, $R_{\min} = R_{\text{med}}$;

если $R_{\text{me}} < T_1$, $R_{\text{me}} = 2 \times R_{\text{me}} - R_{\text{med}}$ и $R_{\min} = R_{\text{med}}$.

Шаг 4. Построить гистограмму H из 256 элементов.

Шаг 5. Вычислить порог бинаризации $T = \min(H(R_{\min}) + c \cdot R_{\text{me}})$, где c – эмпирически подобранная константа.

Шаг 6. Построить маску FOV посредством бинаризации красного канала R с порогом T .

Примеры масок, построенных предложенным алгоритмом и алгоритмом Отсу, приведены на рисунках 2 и 5. Алгоритм Отсу часто не дает корректную маску для темных изображений. Экспериментально были подобраны значения переменных $T_1 = 30$ и $c = 3$.

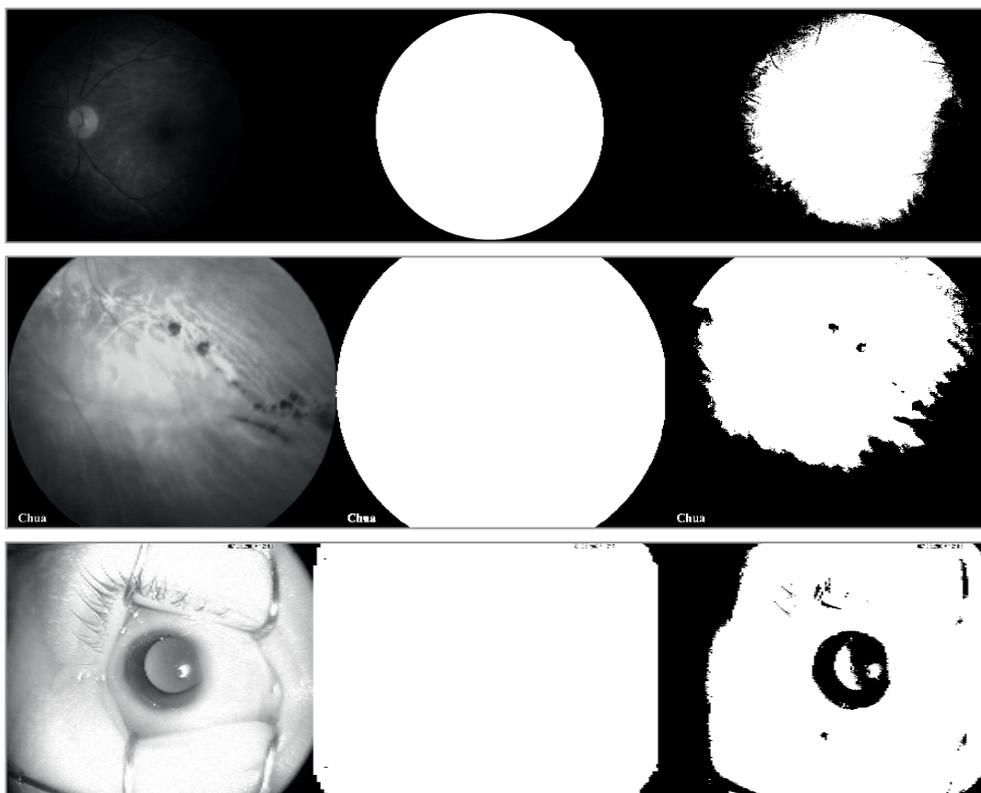


Рис. 5. Примеры изображений красного канала R (2_bad и 2_good), маски FOV, полученной предложенным алгоритмом и алгоритмом Отсу

Этап 2. Удалить нерезкие и мало-контрастные изображения

Из маски FOV вырезается описывающий область сетчатки прямоугольник и вырезается соответствующая ему часть исходного изображения. Затем изображение и маска масштабируются в матрицы размером 512x512 пикселей. Приведение к единому размеру необходимо в силу существенных различий в размерах исходных изображений, формируемых разными камерами, что влияет на распределение локальных оценок качества, вычисляемых ниже.

Обобщенный алгоритм

оценки качества изображения сетчатки

Шаг 1. Из вырезанного фрагмента цветного изображения сетчатки извлечь матрицу значений зеленого канала G.

Шаг 2. На изображении G в области FOV вычислить массив локальных оценок качества localFM.

Шаг 3. Построить гистограмму массива localFM и аппроксимировать распределениями Вейбулла и Гаусса. Вычислить три параметра: mean (среднее распределения Гаусса), scale и form (параметры распределения Вейбулла – масштаб и форма, соответственно). Указанные параметры используются в качестве глобальных оценок качества изображения.

Шаг 4. Нормализовать полученные оценки в диапазон [0, 1] по формуле: $f(x) = x/(x + 1)$, где x – нормализуемый параметр.

Шаг 5. Согласно пороговым значениям нормализованных оценок отнести изображение к одному из двух классов: удовлетворительное или неудовлетворительное качество.

Для выбора подходящих локальных оценок были выполнены эксперименты на базах DRIMDB (рис. 6) и HRF (рис. 8). В результате анализа литературы для вычислений на шаге 2 алгоритма было отобрано и проанализировано 18 безэталонных мер (они описаны в статьях [15–20]): BREN, CMO, CONC, CONL, CURV,

EBCM, FISH, FUS, GORD, HELM, LAPD, LAPL, LAPM, LOCC, LOEN, SHAR, WAVS, WAVR.

Приведем краткое описание особенностей некоторых мер:

– BREN – оценка фокуса, вычисляемая через квадрат разности яркости левого и правого соседей через один пиксель.

– EBCM – оценка контраста, основанная на локальном вычислении краев, построенных оператором Собела.

– FISH – используются вейвлет-преобразования для оценки резкости.

– LAPD – оценка фокуса, основанная на использовании оператора Лапласа.

– SHAR – оценка резкости, основанная на вычислении глобального градиента.

– WAVS – оценка фокуса, основанная на вейвлет-преобразованиях изображения (сумма трех вейвлет-коэффициентов первого уровня после преобразования).

Эксперименты

с изображениями базы DRIMDB

На рис. 7 представлены графики глобальных оценок для 17 изображений (рис. 6) с использованием четырех мер качества (CURV, EBCM, SHAR, WAVS). Изображения с первого по девятое имеют неудовлетворительное качество, с десятого по 17-е – удовлетворительное. Из рис. 7 следует, что при использовании меры CURV невозможно разделить изображения на два класса. При использовании локальных мер EBCM и параметра form (рис. 7, б) изображения делимы по порогу 0,35. В табл. 3 отобраны меры, которые позволяют разделить изображения сетчатки на два класса (удовлетворительного и неудовлетворительного качества).

Анализируя полученные данные для меры BREN для изображений базы HRF можно сделать следующие выводы: параметр form не подходит для анализа качества изображений; порог для разделения изображений на два класса для параметра scale

Таблица 3. Пороговые значения оценок качества для изображений базы DRIMDB

Мера	BREN	EBCM	FISH	LAPD	SHAR	WAVS
Параметр	scale	form	mean; scale	mean, scale	mean; scale	mean; scale
Порог	0,92	0,35	0,79; 0,8	0,4; 0,88	0,35; 0,7	0,45; 0,55



Рис. 6. Изображения базы DRIMDB, отобранные для демонстрации работы алгоритма оценки качества

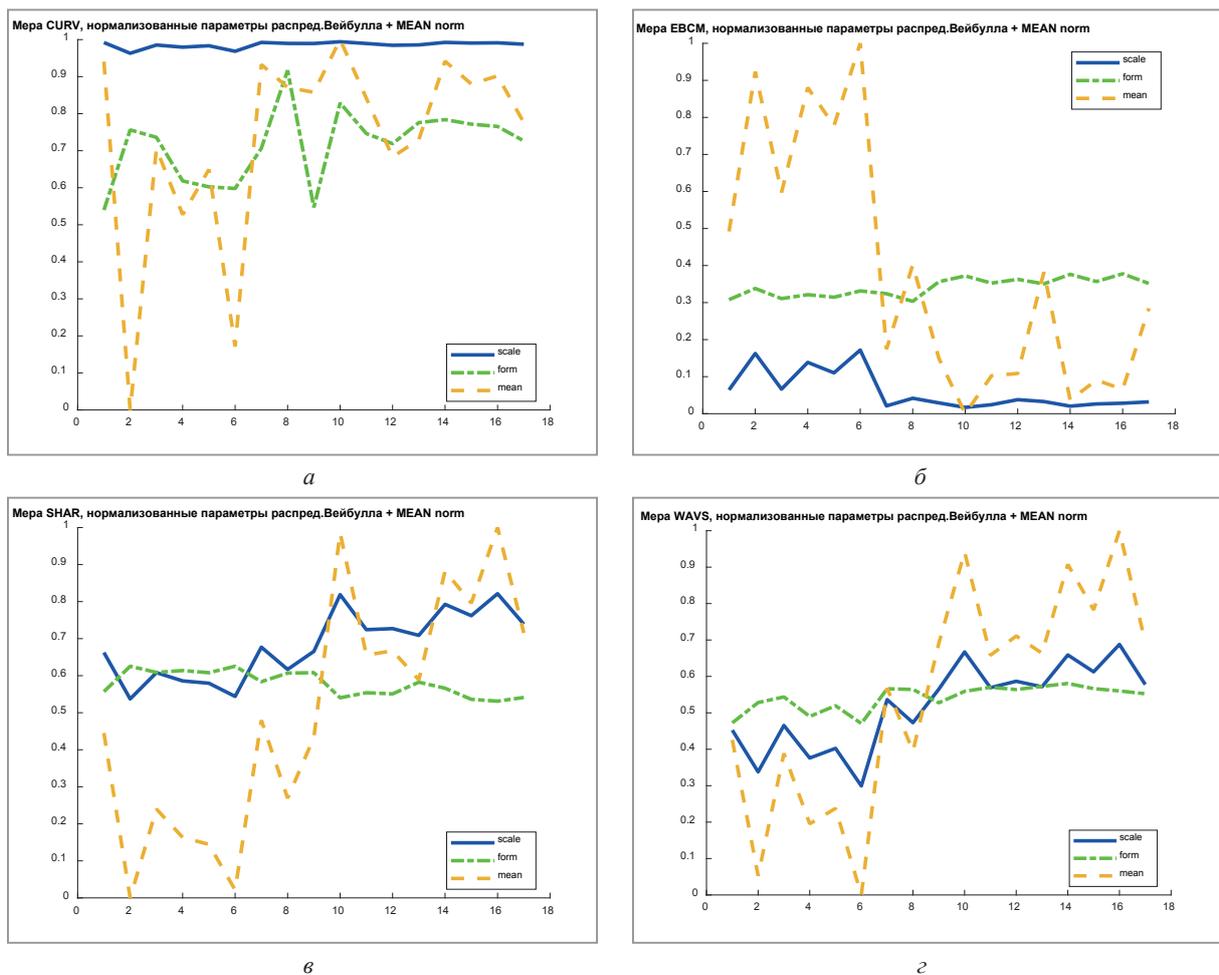


Рис. 7. Графики количественных оценок качества (оба параметра Вейбулла и среднее значение распределения Гаусса) для 17 изображений базы DRIMDB: а – мера CURV, б – мера EBCM, в – мера SHAR, г – меры WAVS

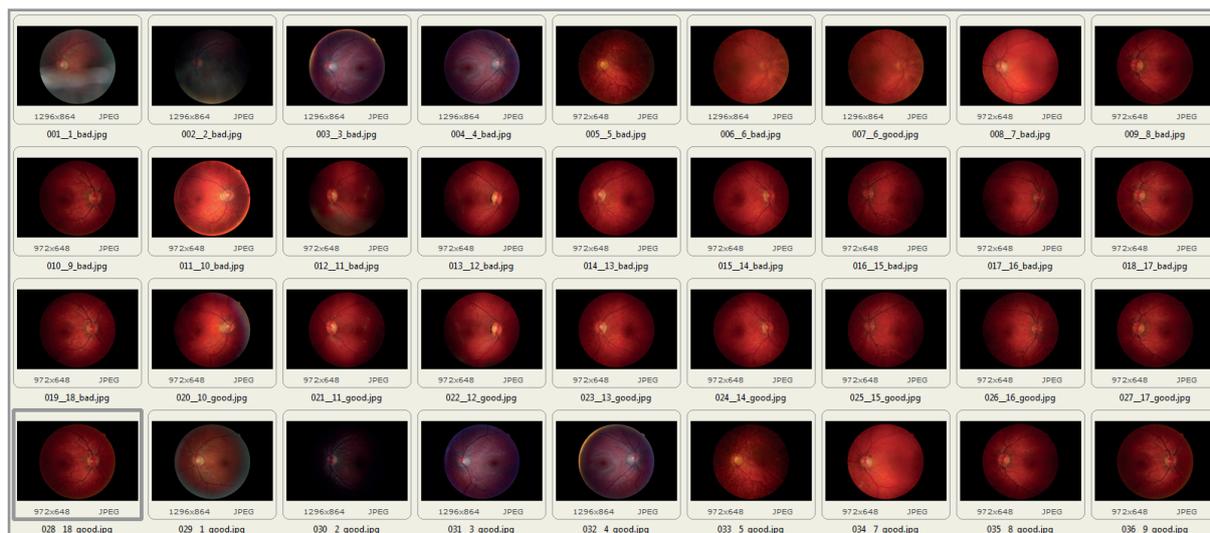


Рис. 8. Исходные 36 изображений для экспериментов (база HRF)

Таблица 4. База HRF, значения параметров распределений для меры BREN

глобальная оценка	номер изображения в базе																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
scale	0,68	0,48	0,61	0,75	0,60	0,47	0,49	0,72	0,68	0,64	0,81	0,69	0,74	0,61	0,62	0,55	0,54	0,72
form	0,31	0,34	0,33	0,31	0,32	0,36	0,35	0,31	0,32	0,33	0,31	0,31	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,31
mean	0,86	0,65	0,78	0,89	0,79	0,59	0,64	0,88	0,84	0,79	0,92	0,86	0,90	0,81	0,78	0,70	0,67	0,86
глобальная оценка	номер изображения в базе																	
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
scale	0,72	0,87	0,89	0,90	0,87	0,87	0,87	0,87	0,89	0,89	0,85	0,81	0,90	0,88	0,85	0,86	0,89	0,89
form	0,31	0,39	0,37	0,37	0,38	0,39	0,39	0,39	0,38	0,38	0,39	0,40	0,37	0,39	0,40	0,38	0,38	0,38
mean	0,87	0,92	0,94	0,95	0,92	0,91	0,92	0,92	0,94	0,94	0,90	0,87	0,94	0,93	0,90	0,92	0,94	0,94

равен 0,76 (меньше – неудовлетворительное качество; больше – удовлетворительное); порог для разделения изображений на два класса параметром mean равен 0,90 (меньше – неудовлетворительное качество; больше – удовлетворительное).

Одиннадцатое и тринадцатое изображения создателями базы отнесены к классу неудовлетворительного качества. Однако меры BREN, FISH определяют, их как удовлетворительные. Визуальный анализ этих изображений показывает, что часть сосудов размыта, а часть остается резкой. Поэтому однозначно определить качество на данном этапе сложно. Более точно качество изображения в таких ситуациях на следующем этапе.

Меры и пороговые значения, которые позволяют разделить изображения сетчатки базы

HRF на два класса (удовлетворительное и неудовлетворительное качество), указаны в табл. 5.

Таблица 5. Пороговые значения глобальных оценок качества для изображений базы HRF

мера	BREN	FISH
параметры	mean; scale	mean; scale
пороги	0,76; 0,90	0,86; 0,73

Этап 3. Отбросить изображения, на которых плохо выделяется сеть кровеносных сосудов

Была исследована дополнительная возможность оценки качества изображений сетчатки посредством оценки полноты выделения системы кровеносных сосудов на изображениях базы HRF. Визуально плохие изображения от хороших неотличимы. Они различимы только по степени полноты выделения сетки

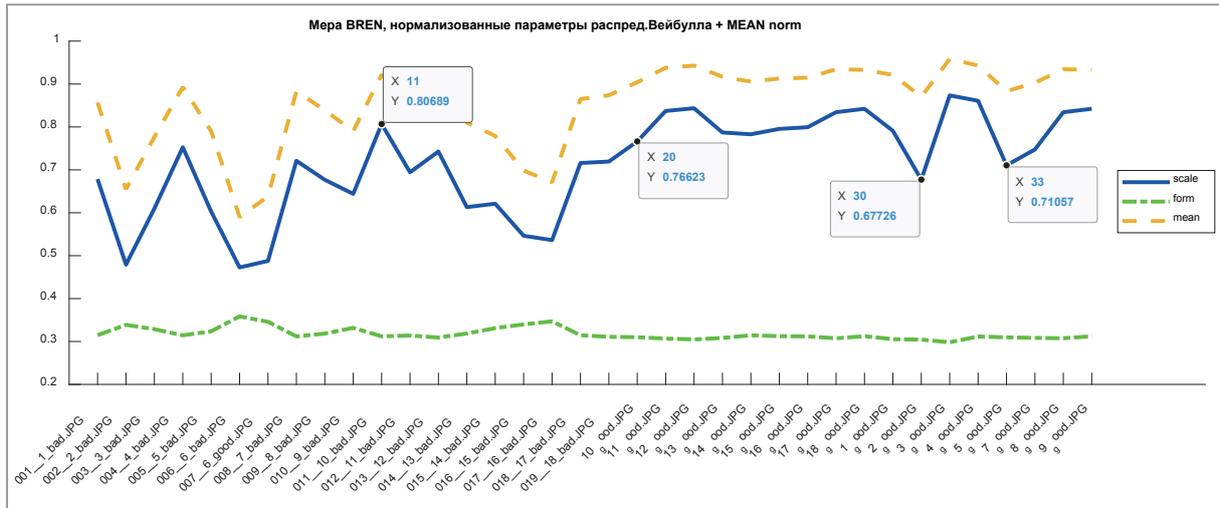


Рис. 9. Графики значений трех параметров распределений (scale, form, mean) для меры BREN (изображения базы HRF)

сосудов (рис. 10). Т.к. зеленый канал изображения сетчатки является самым контрастным, он используется для выделения кровеносных сосудов.

Алгоритм выделения сосудов

Шаг 1. Для пикселей зеленого канала G, соответствующих маске FOV, выполнить адаптивное выравнивание гистограммы (метод CLAHE).

Шаг 2. Создать размытый вариант изображения G2 фильтром Гаусса.

Шаг 3. Выделить края на разности изображений G и G2.

Шаг 4. Выполнить бинаризацию G и фильтрацию краев для формирования маски сосудов.

Шаг 5. Вычислить количественные характеристики выделенной сетки сосудов (например, процент отношения площади сосудов на области FOV к такому же проценту на изображениях удовлетворительного качества).

Результат выделения сосудов представлен на рис. 11. Малый процент выделенных сосудов означает неудовлетворительное

качество. Более точный результат дает использование выделенных белых пикселей как центров вычисления локальных признаков на изображении зеленого канала исходного изображения.

Заключение

Понятие качественного изображения сетчатки глаза в научно-технической и медицинской литературе не определено. Под качественным изображением в данной работе понимается такое, которое позволяет корректно решить задачу классификации степени заболевания. В статье предложено оценивать качество изображения в несколько этапов.

Разработан новый алгоритм бинаризации изображений, отличающийся от известных, ориентацией на применение к изображениям сетчатки глаза разного качества. Этот алгоритм позволяет построить более точную бинарную маску изображения сетчатки, которая используется для первичной оценки качества изображения.

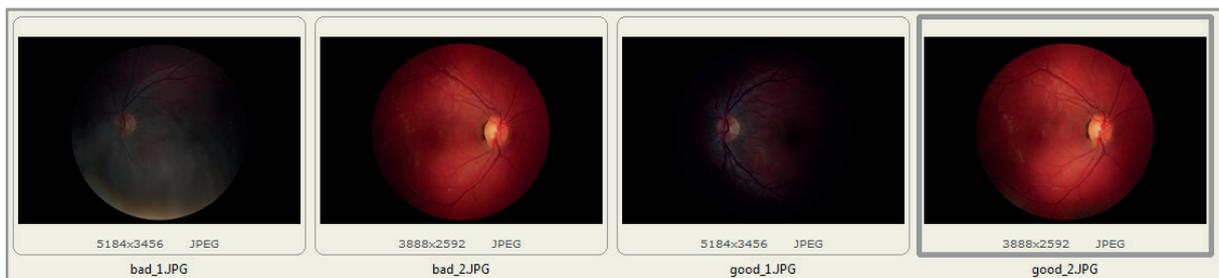


Рис. 10. Примеры изображений неудовлетворительного (два левых) и удовлетворительного качества (два правых)

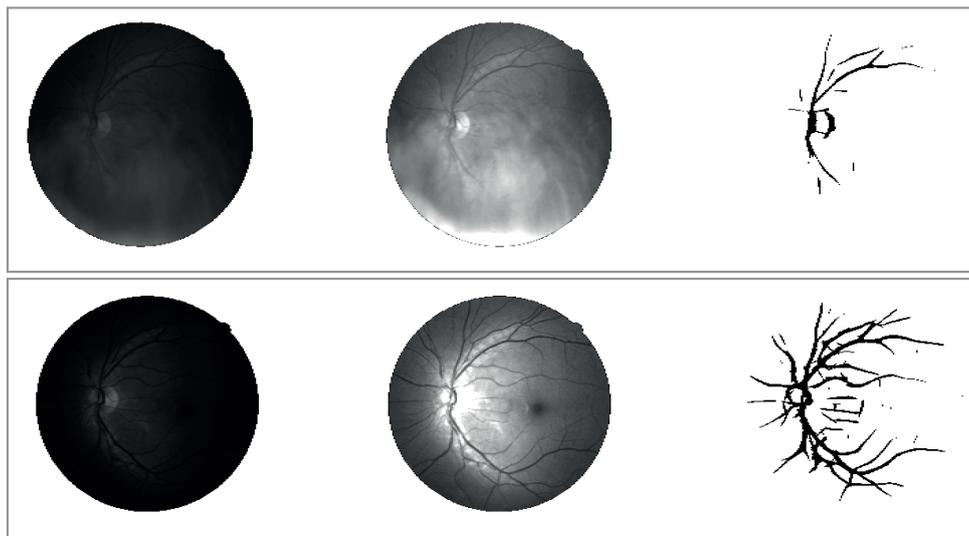


Рис. 11. Результаты выделения сосудов на изображениях сетчатки

Для реализации следующего этапа, протестирован и отобран ряд оценок качества изображений в отсутствие эталона, позволяющих оценить контраст и резкость изображения сетчатки для выделения удовлетворительных для медицинского анализа изображений.

Эксперименты, подтверждающие работоспособность предложенного подхода, выполнялись на разнообразных изображениях десяти доступных в интернете баз данных, описанных в табл. 1.

Работа частично выполнена в рамках проектов БРФФИ Ф20РА-014 и Ф21ПАКГ-001.

ЛИТЕРАТУРА

1. Diabetes – Statistics & Facts [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://www.statista.com/topics/1723/diabetes/#dossierKeyfigures>.– Дата доступа: 03.11.2021.
2. **Tilahun M., et al.** Prevalence of Diabetic retinopathy and its associated factors among diabetic patients at Debre Markos referral hospital, Northwest Ethiopia, 2019: hospital-based cross-sectional study, *Diabetes, Metabolic Syndrome and Obesity: Targets and Therapy*.– 2020.– Vol.13.– pp.2179.
3. **Krause J., et al.** Grader variability and the importance of reference standards for evaluating machine learning models for diabetic retinopathy, *Ophthalmology*, 2018, Vol.125, No.8, pp.1264–1272.
4. **Manohar P., Mallikarjun S.** Holi comparative study of methods for fundus mask generation, *International Journal of Advanced Science and Technology*, 2020, Vol. 29, No. 3, pp. 9642–9653.
5. **Gagnon L., et al.** Procedure to detect anatomical structures in optical fundus images, *SPIE Conf. on Medical imaging*, 2001, Vol. 4322, pp. 1218–1225.
6. **Youssif A.A.H.A.R., Ghalwash A.Z., Ghoneim A.A.S.A.R.,** Optic disc detection from normalized digital fundus images by means of a vessels' direction matched filter, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2007, Vol.27, No.1, pp.11–18. doi: 10.1109/TMI.2007.900326.
7. **Niemeijer M., et al.** Fast detection of the optic disc and fovea in color fundus photographs, *Medical Image Analysis*, 2009, 13(6): 859–870. doi:10.1016/j.media.2009.08.003.
8. DRIMDB – Database for quality testing of retinal images [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://academicorrents.com/details/99811ba62918f8e73791d21be29dcc372d660>.– Дата доступа: 09.09.2021.
9. **Khan S.M., et al.** A global review of publicly available datasets for ophthalmological imaging: barriers to access, usability, and generalisability, *The Lancet Digital Health*, 2021, Vol.3, No.1, pp.e51-e66. doi: 10.1016/S2589–7500(20)30240–5.
10. **Ter Haar F.** Automatic localization of the optic disc in digital colour images of the human retina, *Utrecht University*. 2005, MS thesis, 83p.
11. **Hashim F.A., Salem N.M., Seddik A.F.** Preprocessing of color retinal fundus images, 2nd Int. Japan-Egypt Conference on Electronics, Communications and Computers, 2013 Dec 17, pp. 190–193. doi: 10.1109/JEC-ECC.2013.6766410.
12. **Otsu N.** A threshold selection method from gray-level histograms, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, Vol.9, No.1, pp.:62–66.
13. **Aibinu A.M., Salami M.J.E., Shafie A.A.** Retina fundus image mask generation using pseudo parametric modeling technique, *IJUM Engineering Journal*, 2010, Vol.11, No.2, pp.163–177.

14. База изображений EyePACS [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www.eyepacs.com/>.– Дата доступа: 03.11.2021.
15. **Pertuz S., Puig D., Garcia M.A.** Analysis of focus measure operators for shape-from-focus. Pattern Recognition.– 2013.– 46(5).– P. 1415–1432. doi: 10.1016/j.patcog.2012.11.011
16. **Голуб, Ю.И.** Исследование локальных оценок контраста цифровых изображений при отсутствии эталона / Ю.И. Голуб, Ф.В. Старовойтов // Системный анализ и прикладная информатика.– 2019.– № 2 (22).– С. 4–11.
17. **Голуб, Ю.И.** Сравнительный анализ безэталонных оценок резкости цифровых изображений / Ю.И. Голуб, Ф.В. Старовойтов, В.В. Старовойтов // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.– 2019.– № 7 (125).– С. 113–120.
18. **Zhai, G.** Perceptual image quality assessment: a survey / G. Zhai, X. Min // Science China Information Sciences.– 2020.– V. 63.– № 11.– P. 83–135.
19. **Gvozden, G.** Blind image sharpness assessment based on local contrast map statistics / G. Gvozden, S. Grgic, M. Grgic // Journal of Visual Communication and Image Representation.– 2018.– 50.– P. 145–158. doi: 10.1016/j.jvcir.2017.11.017.
20. **Narvekar N.D., Karam L.J.** A no-reference perceptual image sharpness metric based on a cumulative probability of blur detection, Int. Workshop on Quality of Multimedia Experience.– 2009.– P. 87–91. doi: 10.1109/QOMEX.2009.5246972.

REFERENCES

1. Diabetes – Statistics & Facts [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://www.statista.com/topics/1723/diabetes/#dossierKeyfigures>.– Дата доступа: 03.11.2021.
2. **Tilahun M., et al.** Prevalence of diabetic retinopathy and its associated factors among diabetic patients at Debre Markos referral hospital, Northwest Ethiopia, 2019: hospital-based cross-sectional study, Diabetes, Metabolic Syndrome and Obesity: Targets and Therapy.– 2020.– Vol.13.– pp.2179.
3. **Krause J., et al.** Grader variability and the importance of reference standards for evaluating machine learning models for diabetic retinopathy, Ophthalmology, 2018, Vol.125, No.8, pp.1264–1272.
4. **Manohar P., Mallikarjun S.** Holi Comparative study of methods for fundus mask generation, International Journal of Advanced Science and Technology, 2020, Vol. 29, No. 3, pp. 9642–9653.
5. **Gagnon L., et al.** Procedure to detect anatomical structures in optical fundus images, SPIE Conf. on Medical Imaging, 2001, Vol. 4322, pp. 1218–1225.
6. **Youssif A.A.H.A.R., Ghalwash A.Z., Ghoneim A.A.S.A.R.** Optic disc detection from normalized digital fundus images by means of a vessels direction matched filter, IEEE Transactions on Medical Imaging, 2007, Vol. 27, No. 1, pp. 11–18. doi: 10.1109/TMI.2007.900326.
7. **Niemeijer M., et al.** Fast detection of the optic disc and fovea in color fundus photographs, Medical Image Analysis, 2009, Vol.13, No.6, pp. 859–870. doi:10.1016/j.media.2009.08.003.
8. DRIMDB – Database for quality testing of retinal images [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://academicorrents.com/details/99811ba62918f8e73791d21be29dce372d660>.– Дата доступа: 09.09.2021.
9. **Khan S.M., et al.** A global review of publicly available datasets for ophthalmological imaging: barriers to access, usability, and generalisability, The Lancet Digital Health, 2021, Vol. 3, No.1, pp. e51-e66. doi: 10.1016/S2589–7500(20)30240–5.
10. **Ter Haar F.** Automatic localization of the optic disc in digital colour images of the human retina, Utrecht University, 2005, MS thesis, 83p.
11. **Hashim F.A., Salem N.M., Seddik A.F.** Preprocessing of color retinal fundus images, 2nd Int. Japan-Egypt Conference on Electronics, Communications and Computers, 2013 Dec 17, pp. 190–193. doi: 10.1109/JEC-ECC.2013.6766410.
12. **Otsu N.** A threshold selection method from gray-level histograms, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, Vol.9, No.1, pp.:62–66.
13. **Aibinu A.M., Salami M.J.E., Shafie A.A.** Retina fundus image mask generation using pseudo parametric modeling technique, IIUM Engineering Journal, 2010, Vol.11, No.2, pp.163–177.
14. Database EyePACS [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www.eyepacs.com/>.– Дата доступа: 03.11.2021.
15. **Pertuz S., Puig D., Garcia M.A.** Analysis of focus measure operators for shape-from-focus, Pattern Recognition, 2013, Vol. 46, No.5, pp.1415–1432. DOI: 10.1016/j.patcog.2012.11.011.
16. **Golub, Y.I.** Study of local assessments of contrast for digital images / Y.I. Golub, F.V. Starovoitov // System Analysis and Applied Information Science, 2019, No.2 (22), pp. 4–11.
17. **Golub Y.I., Starovoitov F.V.** Comparative analysis of no-reference measures for digital image sharpness assessment, Doklady BGUIR, 2019, No.7 (125), pp. 113–120.
18. **Zhai G., Min X.** Perceptual image quality assessment: a survey, Science China Information Sciences, 2020, Vol. 63, No.11, pp. 83–135.
19. **Gvozden G., Grgic S., Grgic M.** Blind image sharpness assessment based on local contrast map statistics, Journal of Visual Communication and Image Representation, 2018, Vol.50, pp.145–158. doi: 10.1016/j.jvcir.2017.11.017.
20. **Narvekar N.D., Karam L.J.** A no-reference perceptual image sharpness metric based on a cumulative probability of blur detection. 2009 International Workshop on Quality of Multimedia Experience, 2009, pp.87–91. doi: 10.1109/QOMEX.2009.5246972.

Поступила
08.11.2021

После доработки
30.11.2021

Принята к печати
01.12.2021

STAROVOITOV V. V.¹, GOLUB Y. I.², LUKASHEVICH M. M.³

DIGITAL FUNDUS IMAGE QUALITY ASSESSMENT

¹ United institute of informatics problems of the National Academy of Sciences of Belarus

² Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Diabetic retinopathy (DR) is a disease caused by complications of diabetes. It starts asymptotically and can end in blindness. To detect it, doctors use special fundus cameras that allow them to register images of the retina in the visible range of the spectrum. On these images one can see features, which determine the presence of DR and its grade. Researchers around the world are developing systems for the automated analysis of fundus images. At present, the level of accuracy of classification of diseases caused by DR by systems based on machine learning is comparable to the level of qualified medical doctors.

The article shows variants for representation of the retina in digital images by different cameras. We define the task to develop a universal approach for the image quality assessment of a retinal image obtained by an arbitrary fundus camera. It is solved in the first block of any automated retinal image analysis system. The quality assessment procedure is carried out in several stages. At the first stage, it is necessary to perform binarization of the original image and build a retinal mask. Such a mask is individual for each image, even among the images recorded by one camera. For this, a new universal retinal image binarization algorithm is proposed. By analyzing result of the binarization, it is possible to identify and remove images-outliers, which show not the retina, but other objects. Further, the problem of no-reference image quality assessment is solved and images are classified into two classes: satisfactory and unsatisfactory for analysis. Contrast, sharpness and possibility of segmentation of the vascular system on the retinal image are evaluated step by step. It is shown that the problem of no-reference image quality assessment of an arbitrary fundus image can be solved.

Experiments were performed on a variety of images from the available retinal image databases.

Keywords. Diabetic retinopathy, fundus-camera, digital image, image quality assessment, Weibull distribution



Старовойтов Валерий Васильевич, доктор технических наук, профессор. Главный научный сотрудник ОИПИ НАН Беларуси. Лауреат Государственной премии Республики Беларусь (2003г). Сфера научных интересов: обработка и анализ цифровых изображений, полученных в разных участках электромагнитного спектра. Опубликовал более 150 научных работ.

Starovoitov Valery, Doctor of Sciences and professor of computer science. He is a Principal research fellow at the United Institute of Informatics Problems, National Academy of Sciences of Belarus (UIIP NAN Belarus). Award: the State Prize of the Republic of Belarus in science. Research interests of professor Starovoitov are processing and analysis of digital images obtained in different parts of the electromagnetic spectrum. He has published over 150 papers.



Голуб Юлия Игоревна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси».

Yuliya I. Golub, PhD, Associate Professor, Senior Research Fellow at the United Institute of Informatics Problems, National Academy of Sciences of Belarus.



Лукашевич Марина Михайловна, кандидат технических наук, доцент, докторант учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Сфера научных интересов: цифровая обработка изображений, машинное обучение.

Marina M. Lukashevich, PhD, postdoctoral researcher at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Her main research interests includes digital image processing, machine learning.

**УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ**

**MANAGEMENT
OF TECHNICAL
OBJECTS**

В. В. ЛЕГКОСТУП, В. Э. МАРКЕВИЧ

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДО ОБЪЕКТА В РАЗНОСТНО- ДАЛЬНОМЕРНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ПО ДОПЛЕРОВСКИМ СМЕЩЕНИЯМ ЧАСТОТЫ

ОАО «АЛЕВКУРП», Минск, Республика Беларусь

В данной работе приведена методика оценивания дальности до объекта, наводимого вдоль гиперболы на цель с помощью бистатической разностно-дальномерной навигационной системы на плоскости. При этом для решения задачи наведения количество требуемых навигационных позиций уменьшается на одну по сравнению с классическим методом разностно-дальномерной навигации. Однако в алгоритмах наведения все же требуется иметь некоторую оценку дальности наводимого объекта от центра базы, способы получения которой рассмотрены в работе.

Ключевые слова: разностно-дальномерная навигация, бистатическая система, гипербола положения, измерение доплеровского смещения частоты, измерение дальности.

Введение

Множество современных беспилотных транспортных средств оснащаются различными навигационными системами, как инерциальными, так и работающими благодаря внешним навигационным системам. При этом преимуществом разностно-дальномерных навигационных систем, таких как спутниковые навигационные системы, системы типа LORAN, и другие является с одной стороны возможность иметь обслуживать большой поток абонентов, так как информация передается только в одном направлении (от навигационной системы к абоненту), а с другой стороны снизить стоимость и размеры и энергетические требования к абонентскому оборудованию за счет отсутствия необходимости размещать передатчик ответно-запросного сигнала [1]. В [2–3] рассматриваются некоторые использования разностно-дальномерного способа навигации в условиях недостаточного для решения навигационных уравнений количества позиций, когда совокупность навигационных измерений позволяет определить местоположение абонента с точностью до гиперболы положения. При этом разностно-дальномерная навигационная система состояла из двух передающих позиций для плоскостного случая

и трех для пространственного. Используя такие начальные условия задачу попадания абонента в некоторую точку цели можно решить путем наведения абонента вдоль гиперболы положения, проходящей через цель.

Однако если абонент обладает информацией о векторе собственной скорости (используя доплеровский измеритель скорости, БИНС, измерения воздушного напора) и оценивая при этом доплеровские сдвиги частоты с двух передающих позиций (плоскостная задача) и разность дальностей, абонент имеет возможность оценить свою дальность с некоторой точностью вблизи линии базы. Методика определения скорости приведена ниже.

Методика оценивания дальности до подвижного абонента в разностно-дальномерной навигационной системе с использованием оценки доплеровских сдвигов частоты

Рассмотрим бистатическую разностно-дальномерную навигационную систему, образованную двумя передающими позициями P_1, P_2 с известной длиной базы, равной $2c$ и подвижный беспилотный летательный аппарат Б,двигающийся в сторону базы со скоростью V_0 (рис. 1).

Объект осуществляет измерения собственной скорости V_0 , доплеровских сдвигов частот

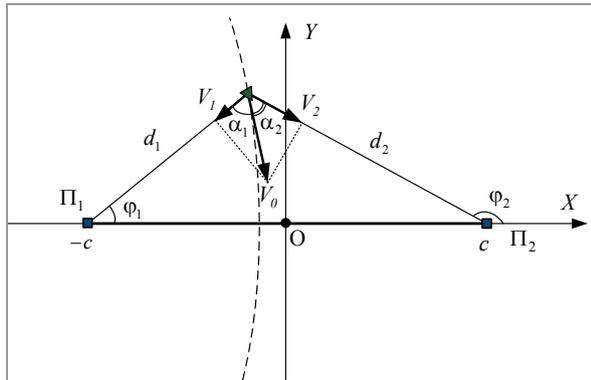


Рис. 1. Разностно-дальномерная навигационная система и подвижный объект, где c – фокусное расстояние или полубаза; d_1, d_2 – дальности от навигационных позиций до объекта; φ_1, φ_2 – углы визирования объекта по отношению к базе; V_1, V_2 – проекции вектора скорости объекта на линии дальностей; α_1, α_2 – углы между вектором скорости и его проекциями соответственно.

$\Delta f_1, \Delta f_2$ принимаемых навигационных сигналов и разность временных задержек распространения Δt навигационного сигнала от позиций до объекта. При этом доплеровские сдвиги частот связаны с проекциями скорости объекта на радиус-векторы дальностей выражениями

$$\Delta f_1 = \frac{V_1}{\lambda}, \tag{1}$$

$$\Delta f_2 = \frac{V_2}{\lambda}.$$

где λ – частота навигационного сигнала.

В свою очередь разность временных задержек Δt зависит от разности дальностей в соответствии с выражением

$$\Delta t = \frac{d_1 - d_2}{c_0}, \tag{2}$$

где c_0 – скорость распространения навигационного сигнала.

Изучение кинематических связей проще осуществлять в эллиптической системе координат в альтернативном представлении, в которой положение объекта задается двумя параметрами: σ определяет линию положения в виде эллипса, τ определяет линию положения в виде гиперболы, причем данные линии являются взаимно ортогональными. Связь данных координат с радиус-векторами дальностей между позициями и объектам осуществляется выражениями [4]

$$\sigma = \frac{d_1 + d_2}{2c}, \tag{3}$$

$$\tau = \frac{d_1 - d_2}{2c}.$$

Из рисунка 1 видно, что скорость объекта V_0 связана с радиальными скоростями V_1, V_2 соотношениями

$$\frac{V_1}{V_0} = \cos \alpha_1, \tag{4}$$

$$\frac{V_2}{V_0} = \cos \alpha_2,$$

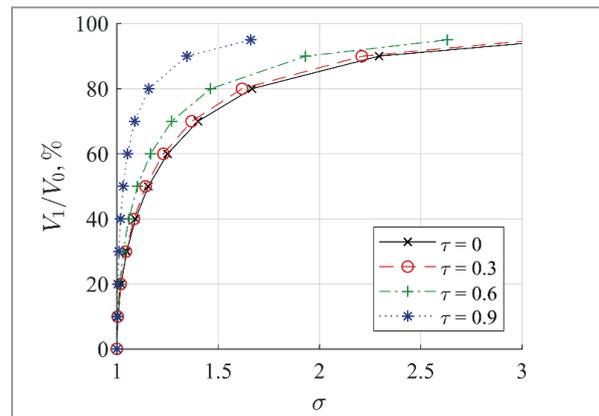
зависимость которых от параметра σ приведена на рисунке 2а.

При этом связь углов треугольника, образованного точками Π_1, Π_2, B определяется равенством

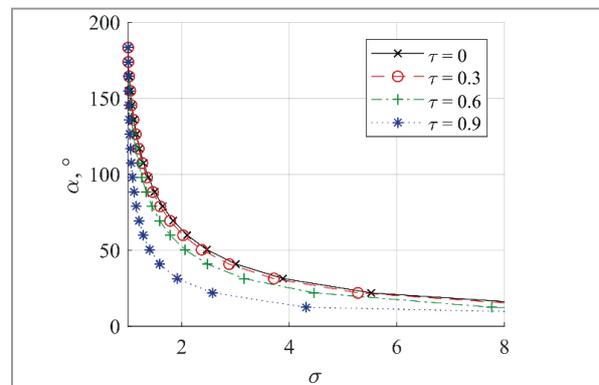
$$\varphi_2 - \varphi_1 = \alpha, \tag{5}$$

где $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ – угол, под которым наблюдается база с позиции объекта.

Зависимость угла α от эллиптической дальности σ представлена на рис. 2б.



а



б

Рис. 2. Зависимость от эллиптической дальности σ отношения V_1/V_2 (а) и угла α (б) для разных значений параметра τ .

Дальности до объекта можно выразить, используя следующие соотношения [4]:

$$d_1 = \frac{c(1-\tau^2)}{\tau - \cos \varphi_1}, \quad d_2 = \frac{c(\tau^2 - 1)}{\tau - \cos \varphi_2}. \quad (6)$$

Собирая воедино второе выражение в (3) и (6), получим следующее соотношения

$$\frac{c(\tau^2 - 1)}{\tau - \cos \varphi_1} + \frac{c(\tau^2 - 1)}{\tau - \cos \varphi_2} = 2c\tau, \quad (7)$$

а используя выражение (5) найдем окончательное выражение для определения угла визирования объекта (с точностью до знака):

$$\begin{aligned} \cos \varphi_1 &= \frac{\tau}{2} \left(1 + \cos \alpha + \sqrt{2} \operatorname{sgn} \tau \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{2}{\tau^2} - \cos \alpha - 1} \right), \\ \cos \varphi_2 &= \frac{\tau}{2} \left(1 + \cos \alpha - \sqrt{2} \operatorname{sgn} \tau \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{2}{\tau^2} - \cos \alpha - 1} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Используя выражение координаты x объекта через его эллиптические координаты:

$$x = c\sigma\tau, \quad (9)$$

а также через полярные координаты:

$$x = d_1 \cos \varphi_1 - c, \quad (10)$$

найдем связь эллиптической дальности σ объекта через его угол визирования со стороны базы:

$$\hat{\sigma} = \frac{\tau \cos \varphi_1 - 1}{\tau - \cos \varphi_1}. \quad (11)$$

Результаты и их обсуждение

Предположим, для вычисления дальности $\hat{\sigma}$ по приведенным выше формулам объект реализует измерения скоростей $\hat{V}_0, \hat{V}_1, \hat{V}_2$. Будем считать, что шумы данных измерений распределены по закону Гаусса:

$$\begin{aligned} \hat{V}_0 &= V_0 + \xi_{V_0}, & \xi_{V_0} &\sim N(0, \sigma_{V_0}^2), \\ \hat{V}_1 &= V_1 + \xi_{V_1}, & \xi_{V_1} &\sim N(0, \sigma_{V_1}^2), \\ \hat{V}_2 &= V_2 + \xi_{V_2}, & \xi_{V_2} &\sim N(0, \sigma_{V_2}^2), \end{aligned} \quad (12)$$

где $\xi_{V_0}, \xi_{V_1}, \xi_{V_2}$ – белые гауссовские шумы измерений;

$\sigma_{V_0}^2, \sigma_{V_1}^2, \sigma_{V_2}^2$ – дисперсии шумов $\xi_{V_0}, \xi_{V_1}, \xi_{V_2}$ соответственно.

Статистические характеристики величины $\hat{\sigma}$, получаемой с помощью выражений (4), (8) и (11), в аналитическом виде получить довольно

сложно. Это обусловлено множеством нелинейных комбинаций и трансформаций величин α_1, α_2, τ в (8) и (11). Кроме того, используя предположение (12) можно заключить, что оценки $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2$, получаемые из выражения (4), являются случайными процессами, имеющими распределение Коши [5], характеризующееся тяжелыми хвостами. Это приводит к быстрому снижению точности получаемой оценки $\hat{\sigma}$ по мере роста дальности между объектом и базой. В общем случае для решения задачи фильтрации имеет смысл прибегнуть к использованию робастных методов фильтрации, менее подверженных влиянию выбросов.

Изучение статистических характеристик оценки величины $\hat{\sigma}$ по приведенному выше алгоритму исследовалось методом Монте-Карло с объемом выборки равном 100000 испытаниям для каждого случая. Скорость V_0 объекта, движущегося к базе, принималась равной 100 м/с. На рис. 3 (а–г) представлены зависимости выборочного среднего $E[\hat{\sigma}]$, выборочной дисперсии $D[\hat{\sigma}]$, выборочного коэффициента асимметрии κ_3 , выборочного коэффициента эксцесса κ_4 от реальной эллиптической дальности σ для различных величин τ . Из этих рисунков видно, что с ростом параметра σ характеристики закона распределения величины $\hat{\sigma}$ быстро изменяются, что существенно ухудшает качество получаемых оценок, которые становятся все более смещенными в совокупности с растущими выбросами относительно их среднего. Выборочные коэффициенты асимметрии и эксцесса указывают на значительный рост интенсивности выбросов с увеличением σ . На дальности $\sigma = 3$, соответствующей удалению объекта от центра базы приблизительно на удвоенную длину базы, смещение выборочного среднего достигает 0,2 (около 7%).

Оценить величину σ можно более точно в случае, если объект пересекает линию базы. Дифференцируя по времени первое выражение в получим скорость изменения величины σ :

$$\dot{\sigma} = \frac{\dot{d}_1 + \dot{d}_2}{2c}. \quad (13)$$

Интегрирование выражения (13) необходимо начать точно в момент пересечения базы, что даст искомую оценку $\hat{\sigma}$:

$$\hat{\sigma} = 1 + \frac{1}{2c} \int_{t_0}^T (\hat{V}_1 + \hat{V}_2) dt, \quad (14)$$

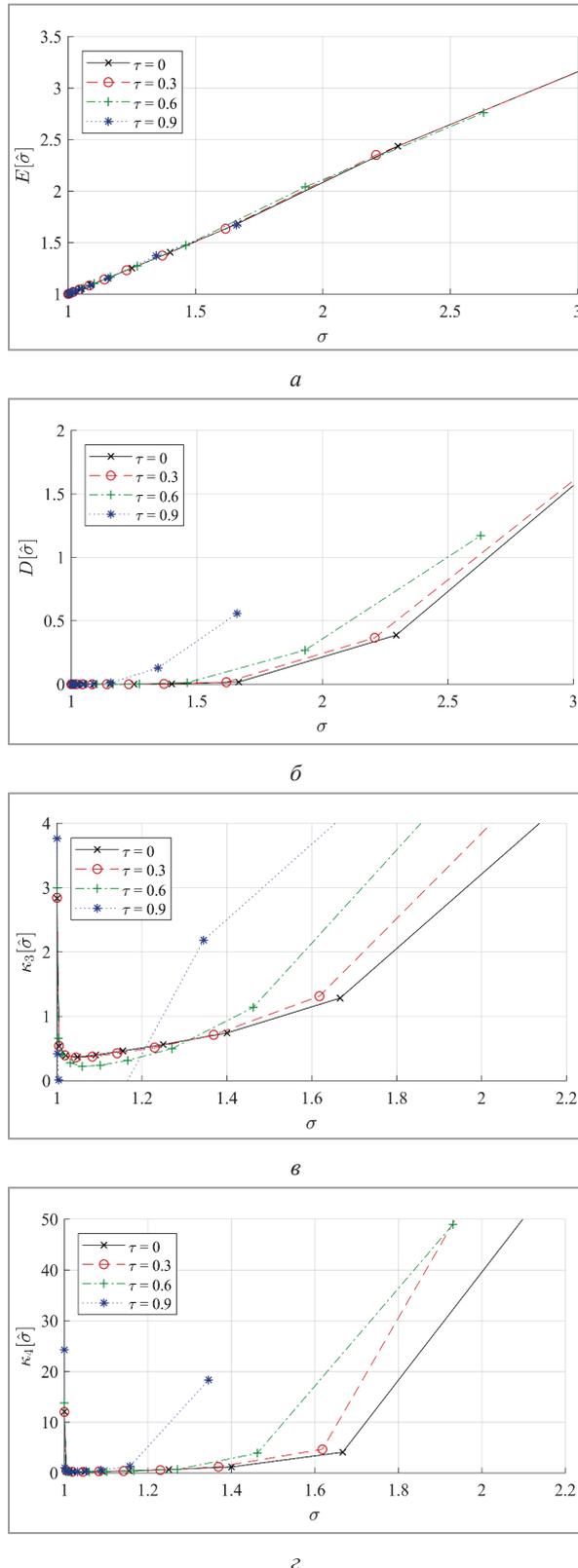


Рис. 3. Зависимости статистических характеристик оценки $\hat{\sigma}$ от реальной эллиптической дальности σ : а – выборочное среднее $E[\hat{\sigma}]$, б – выборочная дисперсия $D[\hat{\sigma}]$, в – коэффициент асимметрии $\kappa_3[\hat{\sigma}]$, г – коэффициент эксцесса $\kappa_4[\hat{\sigma}]$.

где T – текущий момент времени, в который производится съем оценки $\hat{\sigma}$, отсчитываемый с момента пролета линии базы t_0 .

Оценка, получаемая с помощью выражения (14), может быть описана различными моделями. Предлагается описывать величину $\hat{\sigma}$ в виде процесса броуновского движения с коэффициентом сноса, зависящим от времени [6–7]:

$$dX(t) = \mu(t)dt + \chi^2 dW_t \quad (15)$$

где $\mu(t)$ – коэффициент сноса;

χ^2 – коэффициент диффузии;

$\delta W(t)$ – стандартный винеровский процесс.

При этом для момента времени t решение уравнения (15) имеет вид

$$X(t) = X_0 + \int_{t_0}^t \mu(\tilde{t})d\tilde{t} + \chi^2 W(t), \quad (16)$$

где X_0 – стартовая точка процесса в момент времени t_0 .

Поскольку предполагается нормальность шумов оценок \hat{V}_1, \hat{V}_2 , то выражение (14) в соответствии с моделью можно записать в виде

$$\begin{aligned} \hat{\sigma} &= 1 + \frac{1}{2c} \int_{t_0}^T (V_1(t) + V_2(t) + \xi_V(t)) dt = \\ &= 1 + \frac{1}{2c} \int_{t_0}^T (V_1(t) + V_2(t)) dt + \\ &+ \frac{1}{2c} \int_{t_0}^T \xi_V(t) dt \end{aligned} \quad (17)$$

где $\xi_V(t) = \xi_{V_1}(t) + \xi_{V_2}(t)$ – суммарный гауссовский случайный процесс с математическим ожиданием, равным нулю и дисперсией $\sigma_{V_1}^2 + \sigma_{V_2}^2$.

Тогда, в соответствии с выражением (16) величина $\hat{\sigma}$ имеет среднее значение

$$\langle \hat{\sigma}(T) \rangle = \frac{d_1(T) + d_2(T)}{2c}, \quad (18)$$

и дисперсию

$$D[\hat{\sigma}(T)] = \frac{(\sigma_{V_1}^2 + \sigma_{V_2}^2)}{4c^2} (T - t_0). \quad (19)$$

Реальные оценки среднего и дисперсии, получаемые по формулам (18) и (19) и будут иметь некоторое смещение вследствие неучтенной погрешности оценки момента времени t_0 пересечения линии базы объектом. Эта проблема в рамках данной статьи не рассматривалась ввиду необходимости учета модели динамики объекта и его траектории движения.

На рис. 4 приведена траектория движения летательного аппарата на плоскости, скорость которого $V_0 = 200$ м/с, наводимого с помощью разностно-дальномерной навигационной системы вдоль целевой гиперболы положения с параметром $\tau_0 = 0.17$ и длиной базы $2c = 800$ м.

На рис. 5(a–в) приведены реализации оценки $\hat{\sigma}$ с использованием выражений (4), (5), (8), (11) для смоделированной траектории движения БЛА, представленной на рис. 4. На рис. 5(г) приведена реализация той же оценки до момента пересечения линии базы, после чего оценка производилась по выражению (14).

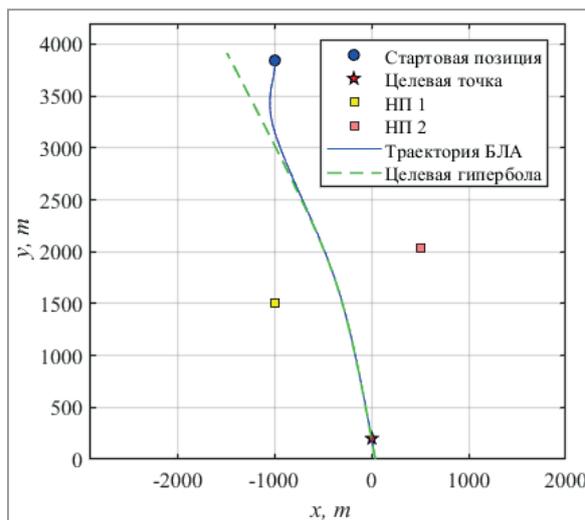
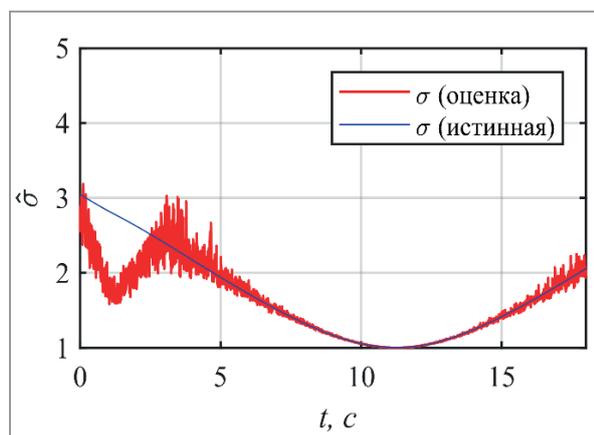
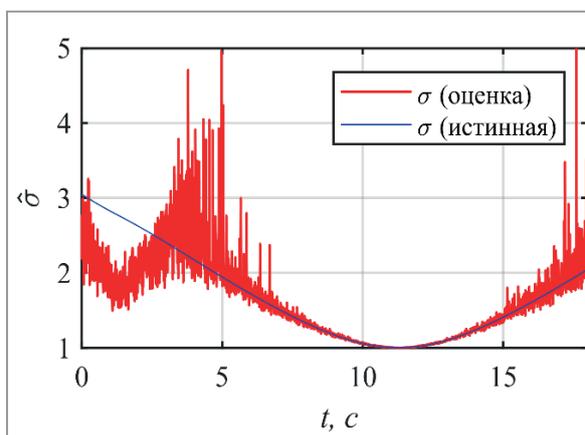


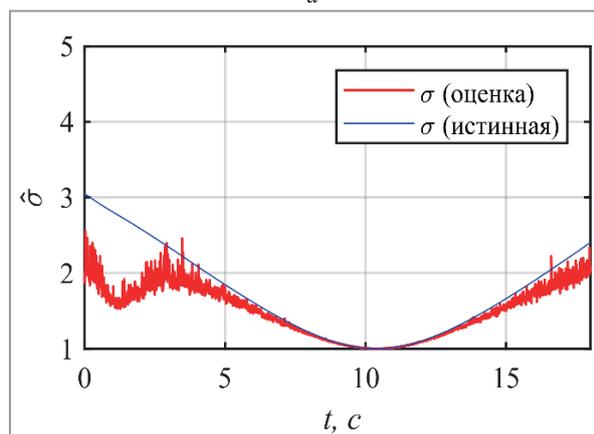
Рис. 4. Траектория движения БЛА, где НП – навигационная позиция.



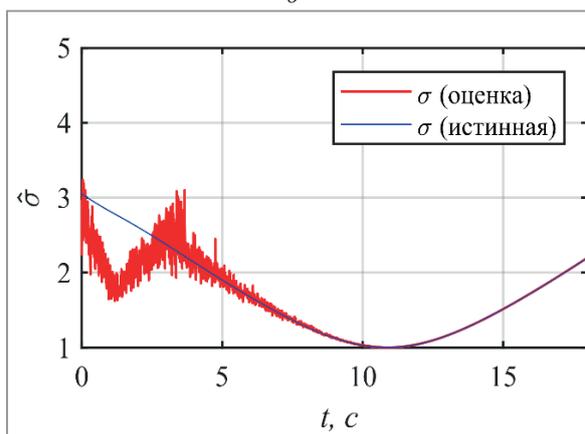
a



б



в



г

Рис. 5. Типичные реализации оценок $\hat{\sigma}$, полученные по результатам компьютерного моделирования движения БЛА по траектории, приведенной на рис. 4 для различных статистических характеристик измерений скорости:

$$a - \sigma_{V_0} = 5 \text{ м/с}, \sigma_{V_1} = 3 \text{ м/с}, \sigma_{V_2} = 3 \text{ м/с}; \quad б - \sigma_{V_0} = 10 \text{ м/с}, \sigma_{V_1} = 6 \text{ м/с}, \sigma_{V_2} = 6 \text{ м/с};$$

$$в - \sigma_{V_0} = 5 \text{ м/с}, \sigma_{V_1} = 3 \text{ м/с}, \sigma_{V_2} = 3 \text{ м/с},$$

а также на 5% смещено среднее значение V_0 ; г - $\sigma_{V_0} = 5 \text{ м/с}, \sigma_{V_1} = 3 \text{ м/с}, \sigma_{V_2} = 3 \text{ м/с}$.

Заключение

Приведенная в данной статье методика оценки дальности до объекта в разностно-дальномерной навигационной системе в соответствии с результатами компьютерного моделирования показала свою работоспособность. Были получены зависимости различных статистических моментов полученных оценок от дальности между объектом и базой.

По результатам анализа данных зависимостей было установлено, что на расстояниях от центра линии базы до объекта, превышающих одну-две длины базы, точность оценок существенно снижается в результате появления смещения выборочного среднего, роста дисперсии. Быстрый рост коэффициента эксцесса значительно усложняет получение адекватных измерений на больших дальностях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Groves, P.D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, 2nd ed., Artech House, 2013.
2. Легкоступ В.В., Маркевич В.В. Уравнения кинематики беспилотного летательного аппарата в эллиптической системе координат при наведении по разностно-дальномерной навигационной информации. «Системный анализ и прикладная информатика». 2021; (1):12–20.
3. Легкоступ В.В. Методика определения кинематической связи между управляющими летательным аппаратом ускорениями и его эллиптическими координатами в альтернативном представлении. «Системный анализ и прикладная информатика». 2021; (3):15–24.
4. “Elliptic coordinates”, Encyclopedia of Mathematics, EMS Press, 2001.
5. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения / В. Феллер; ред. А.Н. Колмогоров; пер. с англ. Р.Л. Добродушина, А.А. Юшкевич, С.А. Молчанова. – Изд. 2-е. – М.: Мир, 1967. – Том 1. – 496 с.: ил.
6. Henderson D, Plaschko P. Stochastic Differential Equations in Science and Engineering. World Scientific, 2006.
7. Allen E. Modeling with Itô Stochastic Differential Equations. Vol. 22. Springer ScienceBusiness Media, 2007.

REFERENCES

1. Groves P.D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, 2nd ed., Artech House, 2013.
2. Legkostup V.V., Markevich V.E. Methodology of determining of the transfer function of engagement kinematics of accelerations of an aircraft and its elliptic coordinates used for thr guidance based on time difference of arrival. «System analysis and applied information science». 2021;(1):12–20.
3. Legkostup V.V. Methodology of determining of the transfer function of engagement kinematics of accelerations of an aircraft and its elliptic coordinates in alternative representation. «System analysis and applied information science». 2021;(3):15–24.
4. “Elliptic coordinates”, Encyclopedia of Mathematics, EMS Press, 2001.
5. Feller W. An Introduction to Probability Theory and Its Applications,” Vol. I, JohnWiley, New York, 1957.
6. Henderson D, Plaschko P. Stochastic Differential Equations in Science and Engineering. World Scientific, 2006.
7. Allen E. Modeling with Itô Stochastic Differential Equations. Vol. 22. Springer ScienceBusiness Media, 2007.

Поступила
01.11.2021

После доработки
15.11.2021

Принята к печати
01.12.2021

VICTOR V. LEGKOSTUP, VITALY E. MARKEVICH

METHOD FOR DETERMINING OF THE DISTANCE TO THE OBJECT IN THE HYPERBOLIC NAVIGATION SYSTEM VIA DOPPLER FREQUENCY OFFSETS

JSC «ALEVKURP» (Minsk, Republic of Belarus)

In this paper, a method for estimating the distance to the object guided along a hyperbola to a target using a bistatic hyperbolic navigation system on a plane is given. At the same time, to solve the guidance problem, the number of required navigation positions is reduced by one in comparison with the classical method of hyperbolic navigation. However, in the guidance algorithms, it is still required to estimate the distance of the targeted object from the center of the base, the methods of obtaining which are considered in the work.

Keywords: hyperbolic navigation, bistatic navigation, position hyperbola, Doppler frequency shift, range measurement.



Легкоступ Виктор Валерьевич, магистр технических наук, научный сотрудник ОАО «АЛЕВКУРП», Беларусь, Минская обл.

Legkostup Victor Valeryevich, research officer, JSC “ALEVKURP”, Minsk, Belarus.

E-mail: legkostupvv@gmail.com



Маркевич Виталий Эдмундович, кандидат технических наук, зам. директора ООО «Научно-производственное объединение САМЕРА», Беларусь, г. Минск.

Markevich Vitaliy Edmundovich, PhD, deputy director of LLC “SAMERA”, Minsk, Belarus.

E-mail: mark.vit@tut.by.

А.А. ЛОБАТЫЙ, А.Ю. БУМАЙ, А.М. АВСИЕВИЧ

ФОРМИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ОБЛЕТЕ ЗАПРЕТНЫХ ЗОН

Белорусский национальный технический университет

Рассматривается задача облета запретных зон беспилотным летательным аппаратом (БЛА), имеющих различную форму и ограничения, задаваемых на основе международной система классификации воздушного пространства для авиации согласно Чикагской конвенции и рекомендуемых принципов формирования запретных зон, правил создания маршрута пролета вдоль запретных зон и действий при нарушении границ запретных зон. Решается задача аналитического синтеза управляющего ускорения беспилотного летательного аппарата (БЛА) при пролете его по маршруту, проходящему вдоль границ запретной зоны заданной формы, по заданной траектории, которая состоит из последовательных отрезков, находящихся на одинаковой высоте относительно земной поверхности, в заданной системе координат. Задача синтеза оптимального управления решается как аналитическое определение оптимального управления линейной нестационарной системой на основе квадратического функционала качества. Предложена математическая модель движения БЛА в горизонтальной плоскости, в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши. Получен закон изменения управляющего ускорения центра масс БЛА на основе задания минимизируемого функционала качества и соответствующих ограничений, что является особенностью рассмотренной методики решения задачи. Предложенный функционал качества учитывает параметры координат и скорости БЛА, которые соответствуют заданным точкам в воздушном пространстве, характеризующим необходимую траекторию для облета запретной зоны. Полученные математические зависимости дают возможность реализовать их на борту БЛА и минимизируют энергетические затраты при управлении БЛА, движущемся через заданные точки пространства. Было проведено компьютерное моделирование полученных аналитических результатов, математических зависимостей, представляющих собой оптимальную траекторию пролета БЛА вдоль границ запретной зоны, а также соответствующих процессов изменения управляющего ускорения и скорости движения БЛА, что позволило сделать выводы о работоспособности предложенной методики и целесообразность ее дальнейшего использования в качестве основы для первоначального этапа синтеза системы управления БЛА.

Ключевые слова: *запретные зоны, беспилотный летательный аппарат, оптимальный закон управления, траектория полета, минимизируемый функционал, математическое моделирование.*

Введение

Настоящее время характеризуется бурным развитием беспилотной авиационной техники в нашей стране и во всем мире. Сферы использования вышеназванной техники, в общем случае разделяют на научные и прикладные, которые в свою очередь имеют разделение в соответствии с гражданским и военным применением.

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) позволяют получать данные для научных исследований и в дальнейшем полученные знания могут быть применены для изучения как самих БЛА (их конструкции, динамики полета) так и для мониторинга природных явлений, оказания определенного вида услуг.

Задачи которые позволяет решить БЛА, можно распределить на несколько групп: задачи мониторинга, включающие видеонаблюдение охраняемых объектов и областей; картографирование земной поверхности и ландшафтов; геологическая разведка полезных ископаемых; инспектирование строительных объектов; видеонаблюдение за труднодоступными промышленными объектами; метеорологическая разведка; экологическая разведка атмосферы и водоёмов; радиационная и химическая разведка; мониторинг опасных природных явлений; оценка результатов после стихийных бедствий и т.п. Новая развивающаяся группа задач применения БЛА доставка грузов, почты, комплектующих, продуктов а также трансляция различных сигналов.

Таким образом применение БЛА охватывает все больше областей человеческой деятельности. В тоже время применение БЛА требует наличие однозначных стандартов в отношении эксплуатационных маршрутов, обеспечивающих соответствующие меры безопасности, при недостаточной мировой практике использования БЛА, в отличие, например, от применения пилотируемой гражданской авиации. Так для гражданской авиации в свое время была создана, так называемая, «Чикагская конвенция о международной гражданской авиации», где даны рекомендации по принципам использования летательных аппаратов [1]. К сожалению, в данном случае, БЛА оказались вне международного правового поля и каждое государство устанавливает свои правила использования БЛА исходя из внутренних нормативно правовых документов и частично применяя положения конвенции.

Существуют четко определенные международные стандарты и рекомендуемая практика, в отношении эксплуатационных маршрутов, разработанных с учетом действующих в каждом государстве нормативных документов и внешних факторов, соответствующие минимумы подлежат утверждению государством эксплуатанта и разрабатываются эксплуатантом воздушного судна с учетом типа воздушного судна, сложности установленного на борту оборудования, характеристик средств обеспечения захода на посадку, оборудования взлетно-посадочной полосы, а также – квалификации операторов. Согласно этим рекомендациям, на аэронавигационных картах вводится общее понятие запретных зон для полетов авиации. Запретная зона – воздушное пространство установленных размеров над территорией или территориальными водами государства, в пределах которого полеты воздушных судов запрещены. Также следует отметить наличие понятия «зон ограничения полетов», которые представляют собой воздушное пространство установленных размеров над территорией или территориальными водами государства, в пределах которого полеты воздушных судов ограничены определенными условиями, кроме того существует термин «опасных зон» – воздушное пространство установленных размеров, в пределах которого в определенные периоды времени

может осуществляться деятельность, представляющая опасность для полетов воздушных судов [2].

Наличие электронной аэронавигационной информации, внедрение навигационных систем, обеспечивающих предоставление точной информации о местонахождении летательных аппаратов, создали предпосылки быстрой разработки надежных электронных карт для отображения этой информации. Система отображения электронных аэронавигационных карт позволяет обеспечить непрерывное отслеживание местоположения летательного аппарата в зависимости от этапа полета и с учетом соответствующих эксплуатационных требований. Принимая во внимание вышеизложенное при формировании маршрута БЛА, стоит задача облета «запретных зон» в автоматическом режиме.

Согласно международным стандартам и рекомендуемой практике при первоначальном установлении государством запретных зон, опасных зон или зон ограничения полетов каждой зоне присваивается обозначение и об этих зонах публикуются подробные сведения. Эти зоны должны быть как можно меньше и *иметь простые геометрические очертания* для облегчения ссылок на них всеми заинтересованными сторонами [3].

Выделяется несколько визуальных форм границ запретных зон для полета, которые представлены на рис. 1 [4].

На рис. 2 представлена кинематическая схема наведения БЛА в заданной $(O^{(k)}X^{(k)}Y^{(k)}Z^{(k)})$ изменяющейся системе координат, где k – номер точки пространства, через которую должна пройти траектория БЛА [5]. В данном случае $k = 1, 3$.

Рассматривается наведение в горизонтальной плоскости, при этом можно отметить, что, пространственная модель принципиальных отличий иметь не будет. На рис. 2 обозначено \vec{v} – вектор скорости БЛА. С учетом реальных условий применения БЛА принято, что $|\vec{v}| = \text{const}$. $\vec{v}_z^{(k)}$ – проекция вектора скорости БЛА на ось $Z^{(k)}$. $\varphi^{(k)}$ – угол ориентации вектора скорости БЛА в k -й точке пространства. $\vec{D}^{(k)}$ – вектор дальности от начальной ($k-1$ -й) до конечной (k -й) точки k -го интервала траектории. $O^{(k)}$ – начало заданной инерциальной системы координат на k -м интервале траектории полета БЛА. В общем случае $k = \overline{0, N}$.

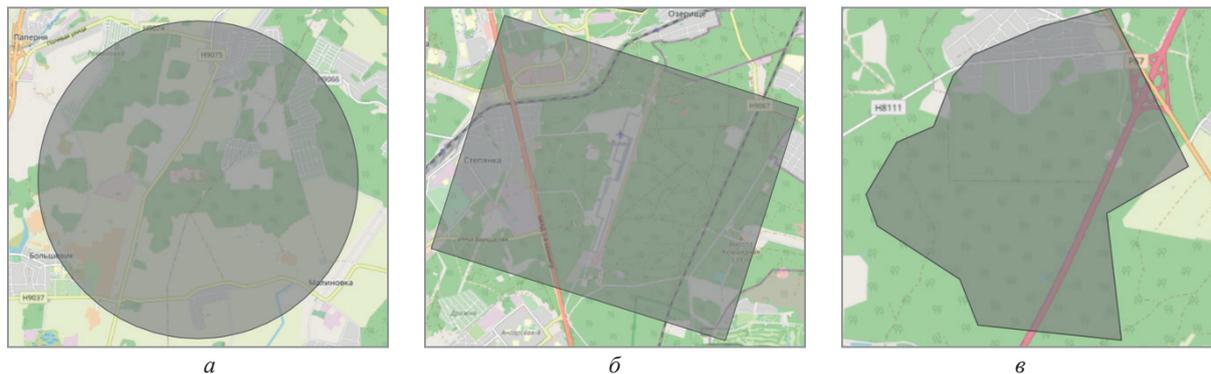


Рис. 1. Формы границ запретных зон: а – круглая форма; б – прямоугольная форма; в – многогранная форма

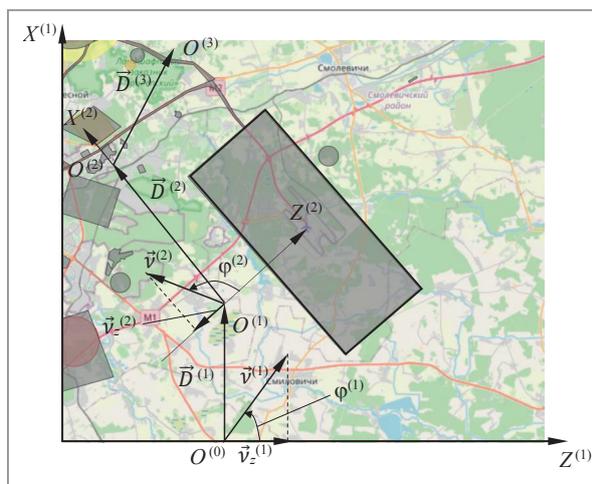


Рис. 2. Кинематическая схема наведения БЛА

В данной постановке задачи особенностью является задание на каждом заданном интервале траектории полета БЛА новой инерциальной системы ординат $(O^{(k)}X^{(k)}Y^{(k)}Z^{(k)})$. При этом начало системы координат $O^{(k)}$ на каждом k -м интервале совпадает с предыдущей заданной точкой траектории полета. При рассмотрении пространственной модели траектории ось $O^{(k)}X^{(k)}$ направлена на следующую $k+1$ -ю точку траектории, ось $O^{(k)}Y^{(k)}$ направлена вертикально вверх, ось $O^{(k)}Z^{(k)}$ составляет с осями $O^{(k)}X^{(k)}$ и $O^{(k)}Y^{(k)}$ правую систему координат.

При математическом моделировании запретная зона представляет собой некую область пространства, описываемую множеством точек с заданными координатами. Формирование пространственной траектории БЛА для облета запретной зоны можно представить как решение задачи в двух плоскостях с последующим их объединением. В работе [6] решается задача аналитический синтеза управляющего ускорения беспилотного летательного аппарата с учетом формирования траектории

в вертикальной плоскости. Такая задача может иметь место в ситуации, когда БЛА осуществляет полет на большой высоте, затем снижается для выполнения задачи и опять набирает высоту, необходимую для предотвращения столкновения с наземными объектами [6].

Как правило ограничения в горизонтальной плоскости представляются наиболее важными так как могут иметь сложную конфигурацию и находиться в непосредственной близости друг от друга, а в некоторых случаях – сосредотачиваться на малых площадях, что усложняет процесс маневрирования летательного аппарата, требуя четкой и выверенной траектории облета, исключающей незапланированного нарушения границ запретных зон и возможности заблаговременного маневра БЛА.

Формирование оптимальной траектории полета БЛА

Рассмотрим решение задачи по формированию траектории БЛА при облете запретной зоны с учетом того, что необходимо обеспечить такое наведение БЛА, при котором оптимальным образом выполняются основные требования, предъявляемые к облику системы управления БЛА и обеспечивается заданная точность приближения траектории полета БЛА к заданным точкам пространства. В качестве запретной зоны будем рассматривать запретную зону № 181 Минского национального аэропорта «Минск 2», входящего в юрисдикцию Министерства транспорта и коммуникаций [4]. Ограничения по высоте в данном случае не рассматриваются так как стоит задача горизонтального облета запретной зоны на безопасном расстоянии. Дополнительные

ограничения по высоте могут быть учтены при необходимости.

В общем случае математическое моделирование полета БЛА включают в себя большое число математических выражений, которые описывают перемещение БЛА как твердого тела в пространстве, включающие уравнения кинематики и динамики движения центра масс и относительно центра масс. Математическая постановка задачи оптимизации представляет собой векторно-матричное управление состоянием:

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t), \quad X(t_0) = X_0 \quad (1)$$

и квадратичный функционал Летова-Калмана [7]:

$$J = X_k^T R X_k + \int_{t_0}^{t_k} [X(t)^T Q(t) X(t) + U(t)^T S(t) U(t)] dt. \quad (2)$$

В выражении (1,2) $X_k = [\Delta x_k, \Delta y_k, \Delta z_k]^T$ – вектор, включающий минимальные отклонения относительно промежуточной k -й точки маршрута; $X(t) = [x(t), y(t), z(t)]^T$ – вектор координат центра масс БЛА; $U(t) = [a_x(t), a_y(t), a_z(t)]^T$ – вектор управлений, состоящий из нормальных ускорений центра масс; $A(t)$, $B(t)$ – матрицы коэффициентов.

Задачу вывода беспилотного летательного аппарата в заданную точку пространства (в том числе подвижную) необходимо рассматривать аналогично задачам, которые решаются известными методами синтеза системы самонаведения летательного аппарата на цель [8]. Задача формирования траектории полета БЛА по заданному заранее маршруту подробно рассматриваются в работе [9].

Рассмотрим для наглядности движение БЛА относительно заданной системы координат на k -м интервале траектории полета в горизонтальной плоскости. Это движение описывается следующей системой линейных дифференциальных уравнений [9]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}^{(k)} &= v_x^{(k)}, & x^{(k)}(0) &= x_0^{(k)}, \\ \dot{z}^{(k)} &= z_x^{(k)}, & z^{(k)}(0) &= z_0^{(k)}, \\ \dot{v}_x^{(k)} &= a_x^{(k)}, & v_x^{(k)}(0) &= v_{x0}^{(k)}, \\ \dot{v}_z^{(k)} &= a_z^{(k)}, & v_z^{(k)}(0) &= v_{z0}^{(k)}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В выражениях (3) обозначено: $x^{(k)}$, $z^{(k)}$ – координаты центра масс БЛА в заданной k -й системе координат; $v_x^{(k)}$, $v_z^{(k)}$ – проекции вектора скорости \vec{v} БЛА на оси k -й системы координат; $a_x^{(k)}$, $a_z^{(k)}$ – ускорения центра масс БЛА в k -й системе координат. В качестве параметра управления БЛА в данном случае будем рассматривать боковое ускорение БЛА $a_z^{(k)}(t)$. Так как в реальных условиях на этапе выполнения БЛА своей основной задачи по мониторингу земной поверхности скорость его полета, как правило, постоянна, то в системе уравнений (3) можно допустить, что $v_x^{(k)} = \sqrt{v^2 - (v_z^{(k)})^2}$, где $v = |\vec{v}|$.

Определим оптимальное управление БЛА (ускорение $a_z^{(k)}(t)$) на k -м интервале траектории полета. Критерий оптимизации (2) в данном случае будет иметь вид:

$$J = \frac{1}{2} \left[c_1 (v_z^{(k)} - v_{\text{зад}}^{(k)})^2 + c_2 (z^{(k)} - z_{\text{зад}}^{(k)}) \right]_{t=t_k} + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} c_3 (a_z^{(k)})^2 dt, \quad (4)$$

где t_k – момент времени, при котором БЛА достигает заданной k -й точки пространства. $v_{\text{зад}}^{(k)}$ – заданное значение проекции скорости БЛА на ось $O^{(k)}Z^{(k)}$ соответствующей инерциальной системы координат на k -м интервале в момент t_k . $z_{\text{зад}}^{(k)}$ – боковая координата заданной k -й точки траектории полета БЛА в момент t_k . c_1 , c_2 , c_3 – коэффициенты, которые задаются с учетом размерности параметров функционала (3).

В работе [9] на основе известных результатов аналитического решения подобных задач [10] получено выражение для бокового ускорения $a_z^{(k)}$, обеспечивающего полет БЛА по оптимальной траектории:

$$a_z(v_z, z, t) = -\Lambda_v(t) [v_z(t) - v_{\text{зад}}] - \Lambda_z(t) [z(t) - z_{\text{зад}}], \quad (5)$$

$$\text{где } \Lambda_v(t) = \frac{(1/c_2) + (1/c_1)(t_k - t)^2 + 1/3(t_k - t)^3}{D(t_k - t)}, \quad (6)$$

$$\Lambda_z(t) = \frac{(1/c_1)(t_k - t) + 1/2(t_k - t)^2}{D(t_k - t)}, \quad (7)$$

$$D(t_f - t) = \left[\frac{1}{c_2} + \frac{1}{3}(t_k - t)^3 \right] \left[\frac{1}{c_1} + t_k - t \right] - \frac{1}{4}(t_k - t)^4. \quad (8)$$

В выражениях (4)-(8) обозначено $v_{зад} = v_{зад}^{(k)} = v_z^{(k)}(t_k) \sin \varphi_{зад}^{(k)}$ [10], где $v_z^{(k)}(t_k)$ – значение проекции скорости БЛА на ось $O^{(k)}Z^{(k)}$ в момент окончания наведения t_k на k -м интервале. $\varphi_{зад}^{(k)}$ – заданный угол подлета БЛА к очередной заданной точке траектории $O^{(k)}$, определяемый ориентацией вектора \vec{v} относительно системы координат $(O^{(k)}X^{(k)}Z^{(k)})$ в соответствии с рис. 2. $t_k - t = t_{ост}$ – время, которое необходимо для достижения БЛА очередной заданной k -й точкой пространства.

$$t_{ост} = t_{ост}^{(k)} = \frac{D^{(k)}}{|\dot{D}^{(k)}|}. \quad (9)$$

$D^{(k)}$ – в данном случае представляет собой текущую дальность от центра масс БЛА до заданной точки $O^{(k)}$ на k -м интервале наведения, $|\dot{D}^{(k)}|$ – модуль скорости сближения БЛА с точкой $O^{(k)}$.

В некоторых случаях интегральным слагаемым функционала (4) можно пренебречь. Данное допущение справедливо, когда БЛА обладает достаточным запасом топлива на всей траектории полета БЛА при относительно небольшой скорости полета [11].

Заметим, что выражения (4)-(8) могут быть справедливы в некоторых случаях и для соответствующей пространственной задачи наведения БЛА. При этом двумерные векторы координат, скоростей и ускорений БЛА заменяются соответствующими трехмерными векторами [11].

В качестве примера рассмотрим изменение траектории полета БЛА в горизонтальной плоскости при облете БЛА запретной зоны № 181 через заданные точки пространства со следующими координатами: $x^{(0)} = z^{(0)} = 0$; $x^{(1)} = 17000$ м, $z^{(1)} = 13000$ м; $x^{(2)} = 40000$ м, $z^{(2)} = 7000$ м; $x^{(3)} = 53000$ м, $z^{(3)} = 13000$ м. Моделирование проведено в компьютерной среде Mathcad для математической модели траектории БЛА. На рис. 3 представлена траектория облета БЛА запретной зоны.

Как показали результаты моделирования данного примера, величины отклонений траектории БЛА от заданных промежуточных точек пространства составили от 7 до 20 метров в зависимости от углов и ориентации вектора скорости \vec{v} . В реальных условиях применения БЛА для решения задач облета запретных зон

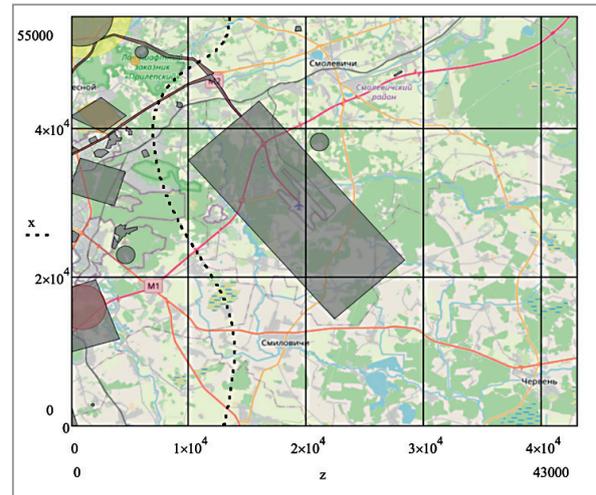


Рис. 3. Траектория БЛА при облете запретной зоны

на безопасном расстоянии, такой результат может быть вполне приемлемым.

Заключение

На основе разработанного метода синтеза параметров управления БЛА предложена методика формирования траектории автоматического облета БЛА заданной запретной зоны в виде последовательности конкретных точек воздушного пространства позволяет путем формирования соответствующей системы координат решать задачу синтеза закона управления БЛА аналитически, получая оптимальное решение при соответствующей математической постановке задачи. Проведение исследования путем математического моделирования наглядно показали работоспособность данного подхода, который может быть использован при разработке алгоритмов систем автоматического управления (автопилота) БЛА. Изменение задач, состоящих при формировании оптимальной траектории полета БЛА (максимальное быстродействие или экономия затрат) в математической постановке задачи учитывается в формализации соответствующей целевой функции (минимизирующего функционала качества). Полученные результаты могут быть использованы для решения других близких задач, например – формирование траектории полета БЛА при мониторинге заданного участка земной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конвенция о международной гражданской авиации [Электронный ресурс]: [заключена в г. Чикаго 07.12.1944] / ИКАО Объединение авиации. – Режим доступа: https://www.icao.int/publications/Documents/9790_ru.pdf. – Дата доступа: 08.10.2021.
2. Конвенция о международной гражданской авиации. Приложение 4: Аэронавигационные карты. [Электронный ресурс]: [заключена в г. Чикаго 07.12.1944] / ИКАО Объединение авиации. – Режим доступа: http://www.6pl.ru/asmap/Annexes/an04_cons_ru.pdf. – Дата доступа: 08.10.2021.
3. Конвенция о международной гражданской авиации. Приложение 11: Обслуживание воздушного движения [Электронный ресурс]: [заключена в г. Чикаго 07.12.1944] / ИКАО Объединение авиации. – Режим доступа: http://www.6pl.ru/asmap/Annexes/an11_cons_ru.pdf. – Дата доступа: 08.10.2021.
4. Национальное кадастровое агентство [Электронный ресурс]: Публичная кадастровая карта / Дополнительные слои: Зоны ограничений/запретные/опасные/запрещенные для использования авиамоделей. – Режим доступа: <https://map.nca.by/layers>. – Дата доступа: 14.10.2021.
5. **Моисеев, В. С.** Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами / В. С. Моисеев. – Казань: ГБУ РЦМКО, 2013. – 768 с.
6. **Лобатый А. А.** Аналитический синтез управляющего ускорения беспилотного летательного аппарата / А. А. Лобатый, А. Ю. Бумай, С. С. Прохорович // Наука и Техника, – 2021. – Т. 20. – № 4. – С. 338–344.
7. Методы классической и современной теории автоматического управления: в 5 т. / под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егулова. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 5 Т. Методы современной теории автоматического управления. – 784 с.
8. **Лобатый, А. А., Икуас Ю. Ф.** Оптимальное программное управление беспилотным летательным аппаратом / А. А. Лобатый, Ю. Ф. Икуас // Наука и Техника, – 2012. – № 73. – С. 17–20.
9. **Лобатый А. А.** Формирование оптимальных параметров траектории пролета беспилотного летательного аппарата через заданные точки пространства / А. А. Лобатый, А. Ю. Бумай, Ду Цзюнь // Доклады БГУИР, – 2019. – № 7–8. – С. 50–57.
10. **Брайсон, А.** Прикладная теория оптимального управления / А. Брайсон, Хо Ю-ши. – М.: Мир, 1972. – 544 с.
11. **Красовский, А. А.** Системы автоматического управления летательных аппаратов / А. А. Красовский А. А., Ю. А. Вавилов, А. И. Сучков. – М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1986. – 477 с.

REFERENCES

1. Convention on International Civil Aviation [Electronic resource]: [signed in l. Chicago 07.12.1944] / ICAO Aviation organization. – Mode of access: https://www.icao.int/publications/Documents/9790_ru.pdf. – Date of access: 08.10.2021.
2. Convention on International Civil Aviation. Application 4: Aeronautical charts [Electronic resource]: [signed in l. Chicago 07.12.1944] / ICAO Aviation organization. – Mode of access: http://www.6pl.ru/asmap/Annexes/an04_cons_ru.pdf. – Date of access: 08.10.2021.
3. Convention on International Civil Aviation. Application 11: Air traffic service [Electronic resource]: [signed in l. Chicago 07.12.1944] / ICAO Aviation organization. – Mode of access: http://www.6pl.ru/asmap/Annexes/an11_cons_ru.pdf. – Date of access: 08.10.2021.
4. National Cadastral Agency [Electronic resource]: Public cadastral map / Addition layers: Zones restricted/forbidden/dangerous/prohibited for using UAV. – Mode of access: <https://map.nca.by/layers>. – Date of access: 14.10.2021.
5. **Moiseev V.S.** Applied theory of control of unmanned aerial vehicles / V.S. Moiseev. –Kazan: GBU RCMKO, 2013. – 768 p.
6. **Lobaty A.A.** Analytical synthesis of the control acceleration of an unmanned aerial vehicle / A. A. Lobaty, A. Y. Bumai, S. S. Prohorovich // Nauka i Tehnika, – 2021. – V. 20. – № 4. – PP. 338–344.
7. Methods of classical and modern theory of automatic control: in 5 v. / ed. K.A. Pupkova and N.D. Egupova. – М.: Izdatelstvo MGTU im. N. E. Baumana, 2004. – 5 V. Methods of classical and modern theory of automatic control. – 784 p.
8. **Lobaty, A. A., Ikuas Y. F.** Optimal software control of the unmanned aerial vehicle / A. A. Lobaty, Y. F. Ikuas // Nauka i Tehnika, – 2012. – № 73. – PP. 17–20.
9. **Lobaty A.A., Bumai A.Y., Du J.** Formation of optimal parameters of the flight path of an unmanned aerial vehicle through specified points in space / A.A. Lobaty, A. Y. Bumai, J. Du // Doklady BGUIR, – 2019. – № 7–83. – PP. 50–57.
10. **Bryson A., Ho Yushi** Applied optimal control theory / A Bryson, Y. Ho. – М.: Mir, 1972. – 544 p.
11. **Krasovskiy, A.A.** Automatic aircraft control systems / A.A. Krasovskij, Y.A. Vavilov, A.I. Suchkov. – М.: VVIA im. N. E. Zhukovskogo, 1986. – 477 p.

Поступила
27.10.2021

После доработки
09.11.2021

Принята к печати
01.12.2021

LOBATY A. A., BUMAI A. Y., AVSIEVICH A. M.

FORMATION OF UNMANNED AIRCRAFT TRAJECTORY WHEN FLYING AROUND PROHIBITED AREAS

Belarusian National Technical University

Considered the problem of flying over restricted areas by an unmanned aerial vehicle (UAV), which have various shapes and restrictions, set on the basis of the international airspace classification system for aviation in accordance with the Chicago Convention and the recommended principles for the formation of forbidden zones, rules for creating a flight route along forbidden zones and actions in case of border violations of restricted areas. The problem of analytical synthesis of the control acceleration of an unmanned aerial vehicle (UAV) is solved during its flight along a route passing along the boundaries of the forbidden zone of a given shape, along a given trajectory, which consists of subsequent segments located at the same height relative to the earth's surface, in a given coordinate system. The optimal control synthesis problem is solved as an analytical definition of the optimal control of a linear non-stationary system based on the quadratic quality functional. A mathematical model of UAV motion in the horizontal plane is proposed, in the form of a system of ordinary differential equations in the Cauchy form. A law for measuring the control acceleration of the UAV's center of mass is obtained on the basis of specifying the minimized quality functional and the corresponding constraints, which is a feature of the considered method of solving the problem. The proposed quality functional takes into account the parameters of coordinates and speed of the UAV, which correspond to the given points in the airspace, which characterize the necessary trajectory for flying around the restricted area. The derived mathematical dependences make it possible to implement them on board a UAV and minimize energy costs when guiding a UAV moving through specified points in space. Computer modeling of the derived analytical results, mathematical dependencies representing the optimal trajectory of the UAV flight along the boundaries of the forbidden zone, as well as the corresponding processes of changing the control acceleration and speed of the UAV movement was carried out, which made it possible to draw conclusions about the efficiency of the proposed method and the feasibility of its further use as a basis for the initial stage of the synthesis of the UAV control system.

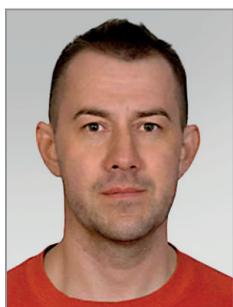
Keywords: prohibited areas, unmanned aerial vehicle, optimal control law, flight trajectory, minimized functional, mathematical modeling.



Лобатый Александр Александрович, доктор технических наук, профессор. Проводит исследования в области анализа и синтеза систем управления, в том числе – беспилотными летательными аппаратами. Автор и соавтор множества статей в научных журналах и конференциях, автор ряда книг и учебных пособий.

Lobaty A. A., Doctor of Science, Professor. Conducts research in the areas of analysis and synthesis of control systems including unmanned aerial vehicles. He is the author and co-author of many articles in scientific journals, conferences and books.

E-mail: lobaty@bntu.by



Бумай Андрей Юрьевич, аспирант кафедры «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета. Проводит исследования в области анализа и синтеза стохастических систем управления применительно к беспилотным летательным аппаратам.

Bumai A. Y., PhD student of « Information Systems and Technologies» department of Belarusian National Technical University. Conducts research in the areas of analysis and synthesis of stochastic control systems applying to unmanned aerial vehicles.

E-mail: andrei.bumai@gmail.com



Авсиевич Андрей Михайлович, кандидат технических наук. Декан факультета «Информационных технологий и робототехники» Белорусского национального технического университета. Проводит исследования в области надежности механических систем. Автор и соавтор ряда статей в научных журналах и конференциях.

Avsievich A. M., Ph.D in Technology. Head of the department «Information Technology and Robotics» at the Belarusian National Technical University. Conducts research in the field of reliability of mechanical systems. Author and co-author of a number of articles in scientific journals and conferences.

E-mail: fitr@bntu.by

**ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**

**DATA PROCESSING
AND DECISION-MAKING**

В. В. ГАНЧЕНКО, Е. Е. МАРУШКО, Л. П. ПОДЕНОК, А. В. ИНЮТИН

ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО 2D-И 3D-ДАНЫМ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗЛОМОВ

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

В работе проведена оценка информативности параметров поверхностей металлических объектов по 2D- и 3D-данным для классификации изломов. В качестве параметров рассмотрены текстурные характеристики Харалика, локальные бинарные образцы, макрогеометрические дескрипторы поверхностей металлических объектов, оцифрованных 3D-сканером. Проведенный анализ на основе оценки информативности позволил выбрать признаки, наиболее подходящие для решения задачи классификации изломов металлов. Результаты будут использованы для разработки комплекса методов судебно-экспертного исследования сложных полигональных поверхностей твердых объектов с применением автоматизированной системы анализа цифровых изображений.

Ключевые слова: излом металла, текстурные характеристики, макрогеометрические дескрипторы

Введение

Исследование микроструктуры поверхности излома позволяет определить структурную траекторию трещины – путь наименьшего сопротивления ее распространению. Однако на практике обычно приходится встречаться со сложным характером рельефа разрушения, содержащим морфологические элементы как хрупкого, так и вязкого излома [1]. Особенности разрушения отражаются на структуре поверхности разрушения. Тонкую структуру излома выявляют с помощью фрактографического анализа – исследования структуры поверхности разрушения в световом и просвечивающем (при помощи реплик) или сканирующем электронном микроскопах. Фрактографический анализ, получивший широкое развитие в последние годы, дает важную информацию о механизме разрушения.

Существуют разные методы исследования изломов [2]. Для исследования макроскопического, микроскопического строения изломов применяют оптический метод, методы световой микроскопии, электронной микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, стереоскопические, стереологический, оптико-структурного машинного анализа и измерение геометрических параметров изломов по голографическим изображениям.

Фрактография – это один из основных методов исследования разрушения конструкционных материалов, которая чаще всего носит качественный характер [2, 3]. Трудоемкость измерения параметров геометрии излома состоит в том, что иногда нет возможности, получить z-координаты рельефа на всех масштабных уровнях.

Однако плоское изображение не учитывает рельеф, которым обладает поверхность, образованная по любому механизму разрушения. Поэтому информации, получаемой из таких данных может оказаться недостаточно для надежной классификации изломов. Дополнительную информацию и описание механизма разрушения поверхности могут дать 3D-данные.

Одним из подходов к анализу подобных 3D-данных является оценка макрогеометрии поверхности. Макрогеометрия поверхности характеризует ее формы – овальность, огранка, конусность для цилиндрических поверхностей, выпуклость или извернутость плоскости и т. п. [4]

Исходные данные

На исходных изображениях зарегистрированных фотокамерой и микроскопом с разным разрешением имеются обширные области

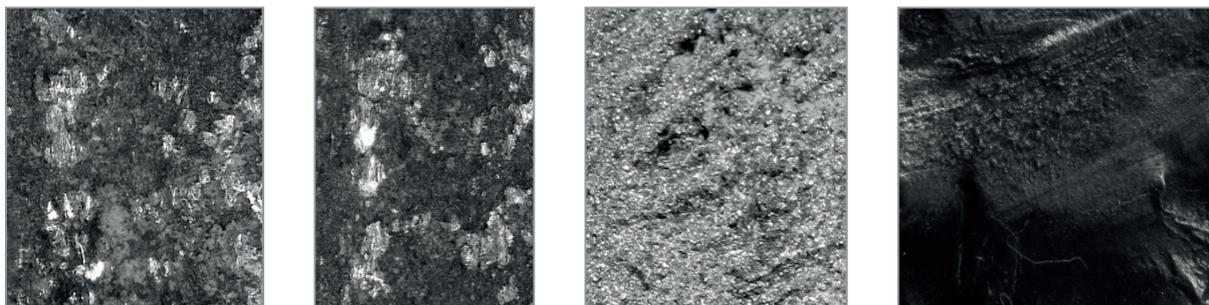


Рис. 1. Примеры изображений, подготовленных для анализа

фона и объекта с изломом, не содержащие собственно изображение излома.

Из визуально подходящих к анализу цветных цифровых изображений объектов были вырезаны прямоугольные фрагменты, содержащие 100% поверхность излома (рис. 1). Изображения были преобразованы в полутоновое представление, т.к. цвет изделия существенно зависит от освещенности и наличия ржавчины на образце.

Все имеющиеся исходные изображения были разделены на 3 группы по типу основного металла: стальные, медно-латунные и алюминиевые. Каждая группа была разбита на 3 подгруппы согласно типу излома, представленному на образце: хрупкий, вязкий и усталостный.

Информативность текстурных признаков

Были детально исследованы следующие группы текстурных признаков на предмет различения изломов трех типов:

- 13 признаков Харалика на базе матриц смежности значений яркости [5];
- локальные бинарные образы пикселей (LBP) [6].

Использовались следующие варианты признаков LBP:

- радиус = 3, количество шаблонов = 24;
- радиус = 5, количество шаблонов = 40;
- радиус = 7, количество шаблонов = 56.

Имя LBP признака содержит его параметры: $lbp_r<радиус>_h<индекс_шаблона>$. После вычисления признаков в каждом пикселе формируется гистограмма их значений. Эта гистограмма и рассматривается как набор признаков. Всего вычислялось 26 значений гистограммы LBP радиуса 3; 42 значений гистограммы LBP радиуса 5; 58 значений

гистограммы LBP радиуса 7. Всего исследовалось 139 признаков.

Оценка информативности признаков выполнялась на основе статистических процедур ANOVA, на базе F -статистики, рекурсивного исключения признаков, на основе $L1$ нормы. Кроме этого использовались ансамбль деревьев, который строит ряд рандомизированных деревьев решений и случайный лес. Выделялись лучшие оценки, найденные каждым методом в отдельности и по сумме нормализованных значений всех признаков.

ANOVA является аббревиатурой от «дисперсионного анализа» и представляет собой параметрический статистический тест гипотез для определения того, происходят ли средние значения двух или более выборок данных из одного распределения или нет.

F -статистика – это класс статистических тестов, которые вычисляют соотношение между значениями дисперсии, такими как дисперсия из двух разных выборок или объясненная и необъяснимая дисперсия, с помощью статистического теста.

Цель рекурсивного исключения признаков (RFE) состоит в том, чтобы выбрать признаки путем рекурсивного рассмотрения всё меньших наборов признаков. Оценивающая модель обучается на начальном наборе признаков, и важность каждого признака определяется коэффициентами модели. Затем наименее важные удаляются из текущего набора признаков. Эта процедура рекурсивно повторяется для сокращения набора признаков, пока не будет достигнуто желаемое количество наиболее информативных признаков.

Линейные модели, с нормой $L1$, имеют разреженные решения: многие из их коэффициентов равны нулю. Когда цель состоит в уменьшении размерности данных для

Таблица 2. Наиболее информативные признаки, выделенные шестью методами

ANOVA		RFE		L1		ExtraTrees		Случайный лес		Комбинированная оценка	
Признак	Оценка	Признак		Признак	Коэфф. модели	Признак	Оценка	Признак	Оценка	Признак	Оценка
lbp_r7_h2	17,71	InverseDiff Moment	-	Sum Average	0,0053	lbp_r7_h1	0,024	lbp_r7_h2	0,045	lbp_r7_h2	2,99
lbp_r5_h2	11,62	Sum Entropy	-	Contrast	0,0011	lbp_r7_h2	0,024	lbp_r7_h1	0,032	SumAverage	2,02
lbp_r7_h3	10,25	Entropy	-	Variance	-0,0003	lbp_r7_h54	0,020	Variance	0,031	lbp_r7_h1	1,75
lbp_r7_h55	10,14	Difference Entropy	-	-	-	Entropy	0,017	Entropy	0,029	Variance	1,69
Variance	7,14	MeasOf Correlation1	-	-	-	lbp_r5_h38	0,015	lbp_r7_h54	0,029	lbp_r5_h2	1,67
lbp_r7_h0	6,67	MeasOf Correlation2	-	-	-	SumAverage	0,015	lbp_r5_h39	0,028	lbp_r7_h54	1,61
lbp_r5_h3	6,35	lbp_r5_h40	-	-	-	SumVariance	0,014	Contrast	0,028	lbp_r7_h55	1,53
ASM	6,21	lbp_r5_h41	-	-	-	ASM	0,014	Difference Entropy	0,025	Entropy	1,50
InverseDiff Moment	6,07	lbp_r7_h56	-	-	-	lbp_r5_h2	0,014	lbp_r7_h55	0,022	Contrast	1,42
lbp_r3_h3	5,67	lbp_r7_h57	-	-	-	Contrast	0,013	lbp_r7_h3	0,022	lbp_r7_h3	1,42

использования другим классификатором, ненулевые коэффициенты убираются. В качестве оценщика использовался линейный SVM классификатор с параметром $C = 0.01$.

Модель ExtraTrees (Extremely Randomized Trees) реализует ансамбль деревьев, который соответствует ряд рандомизированных деревьев решений на различных подвыборках набора данных, и использует усреднение для повышения точности прогнозов и контроля переобучения. ExtraTrees на каждом уровне дерева выбирает разделение признаков случайным образом.

Метод построения случайного леса реализует набор случайно построенных деревьев решений. Случайный лес на каждом уровне дерева выбирает разделение признаков на основании критерия Gini.

В табл. 2 представлены наиболее информативные признаки для изломов на примере медно-латунных сплавов.

На исследуемом наборе изображений изломов на двух группах металлических объектов наиболее информативными оказались

признаки LBP радиусов 3 и 7, а также признак Харалика – Variance.

Информативность макрогеометрических дескрипторов

Были исследованы сканы усталостного излома двух частей стальной шаровой опоры. Для экспериментов были предоставлены четыре скана шаровой и три конусной части объекта. В табл.э 2 приведены макрогеометрические характеристики излома.

В таблице 2 S_{Δ} – площадь всех треугольников модели в мм^2 , S_{\perp} – сумма проекций треугольников на базовую плоскость в мм^2 . Отношения площадей в диапазоне 1,05–1,07 подтверждают ранее сделанное теоретическое предположение [7] о наличии усталостного излома стальной детали.

Из гистограммы отклонений нормалей, представленных на рис. 2, видно, что, несмотря на незначительную разницу в целом гистограммы схожи. Большинство нормалей имеет отклонения не более 15–20°.

Таблица 2. Макрогеометрические характеристики излома

Характеристика	Шаровая часть				Конусная часть		
	561	571	561	555	567	559	555
Площадь S_{Δ}	561	571	561	555	567	559	555
Площадь S_{\perp}	532	532	532	527	537	530	527
Отношение	1,05	1,07	1,05	1,05	1,06	1,05	1,05

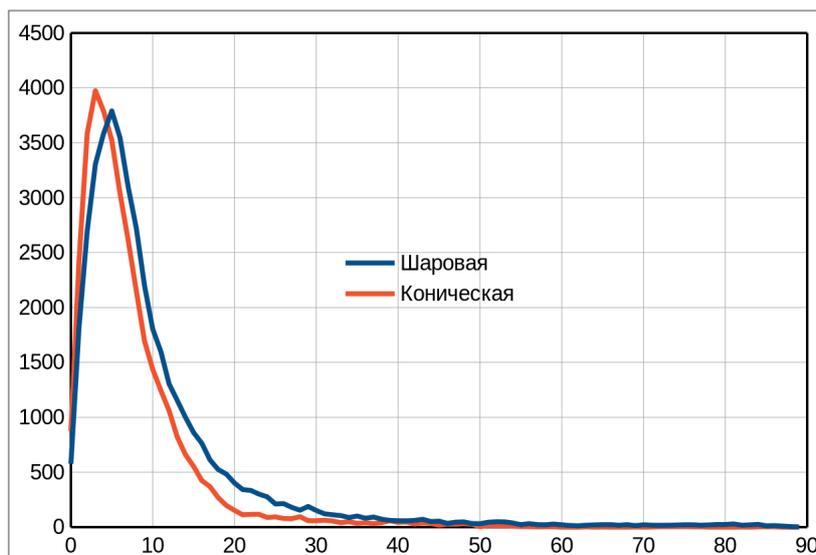


Рис. 2. Распределение отклонений нормалей граней полигональной модели поверхности излома от главной вертикали для двух смежных частей объекта

Вычисленные параметры Вейбулла (масштаб – scale и форма – shape) будем считать макропризнаками типа излома.

Заключение

В результате проведенного в работе исследования был проанализирован ряд текстурных характеристик изображений. В качестве таковых были выбраны текстурные характеристики Харалика, а также локальные бинарные образцы. Проведенный анализ на основе оценки информативности позволил выбрать признаки, наиболее подходящие для решения задачи классификации изломов металлов по их изображениям.

Помимо текстурных характеристик были проанализированы макрогеометрические дескрипторы поверхностей металлических объектов, оцифрованных 3D-сканером. Получаемые при анализе данные позволяют выделять макропризнаки типа излома, что позволит дополнить набор данных для их последующей классификации. Это позволит повысить надежность классификации.

Полученные результаты будут использованы в качестве основы для разработки комплекса методов судебно-экспертного исследования сложных полигональных поверхностей твердотельных объектов с применением автоматизированной системы анализа цифровых изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Гудремон *Специальные стали.* – М.: Металлургия, 1966. – 1274 с.
2. **Ежов, А. А.** Дефекты в металлах. Справочник-атлас / А. А. Ежов, Л. П. Герасимова – М.: Русский университет, 2002. – 360 с.
3. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций / Г. В. Клевцов и др. – М.: МИСиС, 2007. – 264 с.
4. Пути и методы повышения надежности и долговечности изделий машиностроения и приборостроения: сборник / под ред.: Б. М. Бобкова, М. Ю. Кацнельсона, 1968. – 809 с.
5. **Haralick, R. M.** Textural features for image classification / R. M. Haralick, K. Shanmugam, I. H. Dinstein // IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, 1973. – № 6. – P. 610–621.
6. **Ojala, T.** Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns / T. Ojala, M. Pietikainen, T. Maenpaa // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2002. – Vol. 24. № 7. – P. 971–987.
7. Разработать алгоритмы автоматизированной классификации оцифрованных данных макро рельефа поверхности излома, полученных сканером Artec Space Spider. Разработать экспериментальное программное обеспечение для исследования макрогеометрических параметров изломов по результатам сканирования с помощью сканера Artec Space Spider [Текст]: отчет о НИР (заключительный) / ОИПИ НАН Беларуси; рук. Дудкин А. А. – Минск, 2020.

REFERENCES

1. **E. Goodremont** Special steels. – М.: Metallurgy, 1966. – 1274 p. [In russian]
2. **Yezhov, A.A.** Defects in metals. Directory-atlas / A.A. Ezhov, L.P. Gerasimova – Moscow: Russian University, 2002. – 360 p. [In russian].
3. Fractodiagnosics of destruction of metallic materials and structures / G.V. Klevtsov et al. – М.: MISiS, 2007. – 264 p. [In russian].
4. Ways and methods of increasing reliability and durability of mechanical engineering and instrument-making products: collection / under the editorship of BM Bobkov, M. Yu. Katsnelson, 1968. – 809 p. [In russian].
5. **Haralick, R.M.** Textural features for image classification / R.M. Haralick, K. Shanmugam, I.H. Dinstein // IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, 1973. – № 6. – P. 610–621.
6. **Ojala, T.** Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns / T. Ojala, M. Pietikainen, T. Maenpaa // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2002. – Vol. 24. № 7. – P. 971–987.
7. To develop algorithms for automated classification of digitized data of fracture surface macro-relief obtained by the Artec Space Spider scanner. To develop experimental software for studying macrogeometric parameters of fractures based on results of scanning using the Artec Space Spider scanner [Text]: research report (final) / OIPI NAS of Belarus; hands. Dudkin A.A. – Minsk, 2020. [In russian].

Поступила
25.10.2021

После доработки
15.11.2021

Принята к печати
01.12.2021

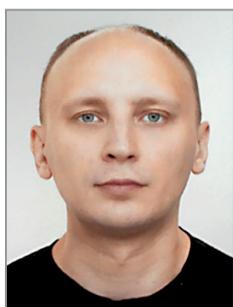
GANCHENKO V., MARUSHKO E., PODENOK L., INYUTIN A.

EVALUATION OF METAL OBJECTS SURFACE PARAMETERS INFORMATIVITY USING 2D- AND 3D-DATA FOR CLASSIFICATION OF FRACTURES

*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

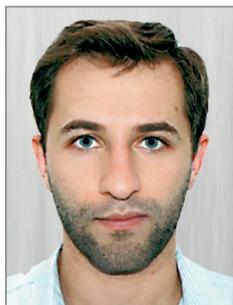
This article describes evaluation the information content of metal objects surfaces for classification of fractures using 2D and 3D data. As parameters, the textural characteristics of Haralick, local binary patterns of pixels for 2D images, macrogeometric descriptors of metal objects digitized by a 3D scanner are considered. The analysis carried out on basis of information content estimation to select the features that are most suitable for solving the problem of metals fractures classification. The results will be used for development of methods for complex forensic examination of complex polygonal surfaces of solid objects for automated system for analyzing digital images.

Keywords: metal fracture, texture features, macrogeometric descriptors



Ганченко Валентин Вячеславович, кандидат технических наук, область научных интересов – цифровая обработка сигналов, дистанционное зондирование.

Ganchenko V., PhD, research interests – digital signal processing, remote sensing.



Марушко Евгений Евгеньевич, область научных интересов – обработка изображений и распознавание образов в системах компьютерного зрения, обработка изображений дистанционного зондирования, обработка телеметрических данных в системах управления космическими аппаратами.

Marushko Y., research interests – image processing and pattern recognition in computer vision systems, remote sensing image processing, telemetry processing in spacecraft control systems.



Поденок Леонид Петрович, область научных интересов – обработка изображений и распознавание образов в системах компьютерного зрения, обработка изображений дистанционного зондирования.

Podenok L., research interests – image processing and pattern recognition in computer vision systems, remote sensing image processing.



Инютин Александр Владимирович, область научных интересов – обработка изображений и распознавание образов в системах компьютерного зрения, обработка изображений дистанционного зондирования.

Inyutin A., research interests – image processing and pattern recognition in computer vision systems, remote sensing image processing.

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

INFORMATION SECURITY

Р. Е. ШАРЫКИН

АПРОБАЦИЯ МОДЕЛИ СТОХАСТИЧЕСКОЙ КОЛЛАБОРАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ВИРУСОВ

Белорусский Государственный Университет

В статье рассматривается реализация на языке Java модели стохастической коллаборационной защиты от вирусов, разработанной в рамках модели Распределенных Объектно-Ориентированных Стохастических Гибридных Систем (РООСГС), и ее анализ. Целью работы является апробация модели стохастической коллаборационной защиты от вирусов в условиях, приближенных к реальным, на пути к внедрению ее использования в реальном окружении. Излагается методика трансляции спецификации системы на языке SHYMaude, предназначенном для спецификации и анализа РООСГС в рамках переписывающей логики, в соответствующую реализацию алгоритма на языке Java. Система разворачивается на виртуальных машинах, вирус и система оповещения моделируются стохастически. Выделяется ряд метрик, таких как время до насыщения вируса, доля зараженных узлов по достижению насыщения, максимальная скорость распространения вируса. Для получения оценок выбранных метрик используется метод Монте-Карло с вычислением доверительных интервалов. Анализ проводится на основе сигмовидного графика распространения вируса по времени в присутствии системы защиты. Реализуются два протокола передачи сообщений между узлами, TCP/IP и UDP. Исследуется влияние типа протокола и сопряженных с ним издержек на эффективность системы защиты. Для оценки потенциала уменьшения издержек, связанных с деталями протокола, проводится анализ исходной модели РООСГС, модифицированной для моделирования таких издержек. Исследуется влияние других параметров модели, необходимых для перехода к следующим шагам внедрения данной модели в практическое использование. Предлагается иерархический подход к обобщению системы, позволяющий сделать систему масштабируемой на большое количество узлов.

Ключевые слова: совместная антивирусная защита; математическое моделирование; распределенные системы; стохастические системы; статистический анализ.

Введение

Ввиду растущей важности и сложности распределенных систем защиты от вирусов, применение формальных методов на различных этапах разработки, от модели до ее реализации в качестве готового приложения представляется важной задачей. Можно выделить такие этапы разработки, как построение предварительной математической модели, апробация модели в условиях, приближенных к реальным, фактическая реализация системы на основе доработанной с учетом всех обнаруженных аспектов модели.

В [1] рассматриваются подходы к построению предварительной математической модели и статистическому анализу сложных динамических распределенных стохастических систем с коммуникацией, а также применение данных подходов к построению и анализу модели коллаборационной стохастической системы защиты от вирусов.

За основу рассматриваемой системы защиты взята система, предложенная в [2]. Система в [2] имела недостаток, заключающийся в возможности нахождения «успешной» атаки в том смысле, что была найдена методика построения атаки [3], следуя которой вирус имел возможность заразить все узлы системы. Данная методика базировалась на использовании формальной модели системы и системы автоматического доказательства теорем. Система автоматического доказательства теорем находила контрпример к формально выраженному утверждению, что не существует последовательности действий вируса приводящей к полному заражению системы. Данный контрпример служил «рецептом» заражения всей системы.

Для преодоления данной проблемы в [1] было предложено сделать систему защиты стохастической. Методика в [3] использовала тот факт, что группы оповещения о заражении фиксировались для системы защиты в начале ее работы. В [1] были предложены случайно

распределенные по всем узлам группы оповещения, которые периодически обновлялись. Статистический анализ системы показал статистическую эффективность такого подхода. Также, данный подход исключает возможность атаки, описанной в [3].

В качестве формальной основы модели используется модель Распределенных Объектно-Ориентированных Систем (РООСГС) [4], основанная на вероятностном расширении [5] переписывающей логики [6]. В рамках модели РООСГС учитываются основные аспекты рассматриваемой системы защиты. Для спецификации и анализа полученной системы используется подход, описанный в [7]. Данный подход позволяет использовать формальные методы в трех аспектах: для задания модели используется язык спецификации SHYMaude [7], разработанный для спецификации моделей РООСГС, для задания метрик системы используется язык QuaTEh, разработанный для формальной спецификации количественных темпоральных свойств системы [8], для статистического анализа применяется инструмент MultiVeStA [9], использующий метод Монте-Карло для построения доверительных интервалов значений метрик.

В данной статье рассматривается следующая фаза разработки стохастической коллаборационной защиты от вирусов. Предварительно исследованная в [1] система транслируется в приложение Java, которое разворачивается на виртуальных машинах, имеющих общую сеть. Приложение имеет встроенную систему статистического анализа, основанную на методе Монте-Карло. Строится график доли зараженных узлов с течением времени и рассчитываются метрики, аналогичные предложенным в [1].

Целью данного исследования является апробация модели в условиях, приближенных к реальным. В процессе реализации системы выясняется, что есть две возможности реализации механизма передачи сообщений – с помощью протоколов TCP/IP и UDP. Протокол TCP/IP гарантирует доставку сообщений и порядок их получения, в то же время он имеет заметно большие временные задержки. Протокол UDP просто отсылает сообщения и имеет минимальные задержки. Были исследованы оба варианта протокола и оценен вклад от использования протокола UDP. Для оценки

максимально возможной выгоды от использования более быстрых протоколов был произведен статистический анализ исходной модели РООСГС, на основе которой осуществлялась реализация, максимально приведенной в соответствие с практической реализацией.

Также было оценено влияние размера групп оповещения и общего количества узлов и рассмотрен вопрос масштабируемости системы.

Реализация коллаборационной стохастической системы защиты от вирусов

В качестве основы для коллаборационной стохастической системы защиты от вирусов используется коллаборационная система защиты от вирусов, предложенная в [2]. Для предотвращения атаки, описанной в [3], вводятся группы оповещения, покрывающие узлы сети случайным образом.

Ввиду того, что предлагаемая модель уже является стохастической, для повышения описательной способности модели, вводятся вероятности в модель вируса, модель обнаружения вируса и алгоритм защиты. Рассматривается вирус, случайно выбирающий узел для заражения через экспоненциально распределенные промежутки времени. Система обнаружения моделируется посредством ложноположительных, когда узел не заражен, но система обнаружения сигнализирует о наличии вируса, и ложноотрицательных, когда узел заражен, но вирус не определяется, вероятностей. Доставка сообщений в системе защиты занимает экспоненциально распределенный промежуток времени.

Алгоритм системы защиты представлен на рис. 1. На рисунке используются следующие обозначения: овал – начало работы, прямоугольники содержат действия, ромбы – условные ветвления, круг обозначает узел с определенным идентификатором *id*, стрелки без сообщений обозначают простой переход, стрелки с сообщением вида $\langle id \leftarrow command \rangle$ обозначают, что стрелка активируется при получении объектом данного сообщения. Система начинает работу с выполнения действий, исходящих из овала «Старт» и далее реагирует на получаемые сообщения. Запланированные сообщения обозначаются $[t, msg]$, где

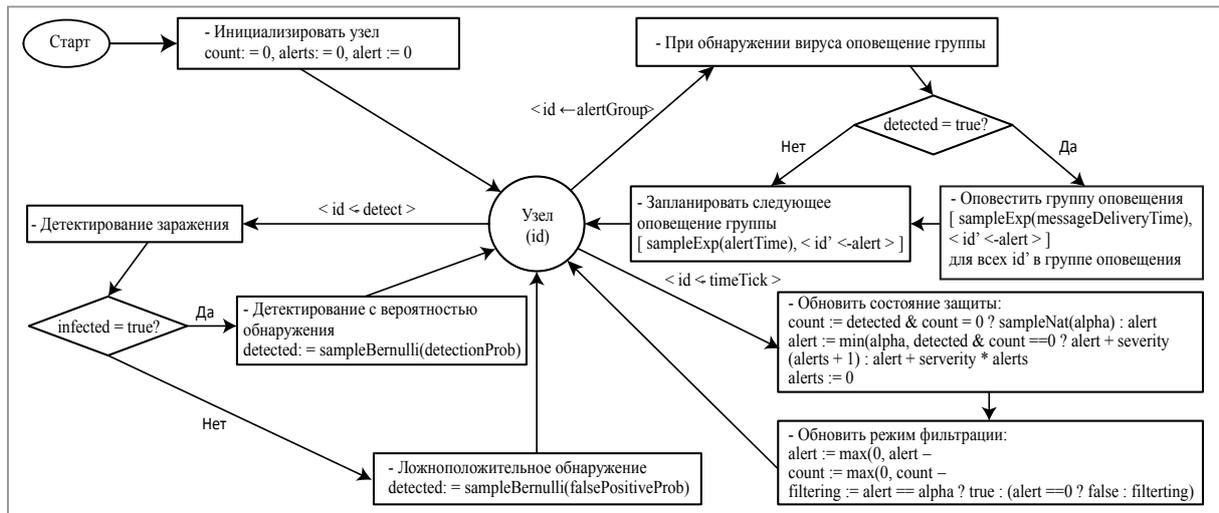


Рис. 1 Коллаборационная стохастическая система защиты от вирусов

t – запланированное время активации сообщения msg . Детальное описание системы и ее динамики может быть найдено в [1].

Система защиты производит детекцию наличия вируса через экспоненциально распределенные промежутки времени. Результат детекции зависит от наличия реального заражения и корректируется ложноположительными (вирус отсутствует, но система сигнализирует наличие) и ложноотрицательными (вирус присутствует, но система его не детектирует) вероятностями. При положительном результате детекции вируса, система рассылает сообщения об обнаружении заражения группе оповещения. При получении такого оповещения, узел увеличивает внутренний уровень тревожности. При превышении данным уровнем предустановленного критического значения, система переходит в режим фильтрации. В состоянии включенной системы фильтрации предполагается, что вирус не может заражать другие узлы, а также узел не может быть заражен при попытке его заражения извне. При отсутствии получаемых оповещений, система равномерно уменьшает уровень тревожности с течением времени. При достижении нулевого уровня тревожности, система выходит из режима фильтрации в обычный режим.

Трансляция спецификации SHYMaude в приложение на языке Java

Спецификация на языке SHYMaude [7] может быть легко транслирована в приложение

на языке Java. Использование фреймворка Spring еще более упрощает процедуру, предоставляя библиотеки, необходимые для реализации асинхронных объектов и средства коммуникации для них.

Более детально, трансляция производится следующим образом. Каждый класс SHYMaude представляется классом Java. Дискретные и непрерывные переменные класса SHYMaude определяются полями класса Java. Их тип выбирается либо `double` для непрерывных переменных, либо `long`, `int`, `boolean`, `enum` в зависимости от контекста для дискретных переменных. Стохастические дифференциальные уравнения (при их наличии), задающие динамику непрерывных переменных, реализуются с помощью разностных схем. Переписывающие правила реализуются в виде соответствующих блоков кода на Java, обновляющих поля, соответствующие переменным SHYMaude в соответствии с правилами перезаписи.

Сообщения могут быть разделены на два класса: сообщения, посылаемые объектом класса самому себе с целью запланировать некоторые действия через промежуток времени и сообщения, посылаемые другим объектам для передачи информации и/или команд на выполнение определенных действий. Сообщения первого типа либо, в простейшем случае, реализуются с помощью подходящего метода используемого фреймворка Java, позволяющего задержать выполнение потока на заданный период времени (в случае одного управляющего сообщения на класс объекта), либо с помощью

некоторого организованного списка запланированных сообщений, каждое из которых вызывает выполнение своего блока кода. Сообщения второго типа отсылаются и принимаются либо с помощью подходящего фреймворка обмена сообщениями внутри узла в случае, если отсылающий и принимающий объект находятся на одном узле, либо с помощью библиотек отсылки-получения сообщений в сети с использованием подходящего сетевого протокола.

На каждом узле выполняется приложение, которое запускает потоки для каждого объекта, определяемого спецификацией. Внутри каждого потока производится ожидание входящих сообщений, как запланированных потоком самому себе, так и от других объектов данной программы и программ, запущенных на других узлах. При получении сообщения, выполняются соответствующие действия, планируются и/или отсылаются новые сообщения.

Трансляция спецификации в язык Java производится естественно в виду того, что и SHYMaude, и Java основываются на объектно-ориентированной модели. Также, наиболее распространенные фреймворки для языка Java предоставляют широкий спектр возможностей по работе с отсылкой-получением сообщений как внутри приложения, так и между приложениями, расположенными на разных узлах сети. Полученная реализация позволяет провести апробацию модели без больших затрат на реализацию системы на более низкоуровневых языках, таких как C/C++. Также, как будет показано далее, на этом этапе возможно статистическое исследование полученной реализации для дальнейшего выявления аспектов, критических для разрабатываемой системы.

Статистический анализ реализации системы защиты

Была проведена апробация системы защиты в условиях, приближенных к реальным. Спецификация была транслирована в приложение Defense [10], реализованное на языке Java с использованием фреймворка Spring. Система узлов была представлена в виде виртуальных машин реализованных на VirtualBox с операционной системой Windows 10, объединенных с помощью внутренней сети VirtualBox.

Каждый узел выполняет приложение Defense, которое реализует модель вируса, модель обнаружения вирусов и систему защиты, описанных ранее. Для проведения статистического анализа приложение Defense имеет web-составляющую, доступную по url, которая предоставляет панель управления приложением. Внешний вид панели управления представлена на рис. 2.

На панели отображается параметр распределения Стюдента, определяющий вероятность того, что истинное среднее находится в вычисленном доверительном интервале, номер текущего прогона системы, целевое количество прогонов, устанавливаемый перед запуском анализа, текущее время, затраченное на анализ (время симуляции).

Далее, в таблице рассчитываются три метрики, являющиеся средним значением следующих величин: доля зараженных узлов в конце каждого прогона, максимальная скорость распространения вируса на прогоне, время до насыщения вируса. Данные метрики более подробно были рассмотрены в [1].

Под таблицей отображается усредненный график распространения вируса: по оси x представлено время внутри прогона, по оси y – усредненная по прогонам доля зараженных узлов на данный момент времени.

С помощью панели управления можно запустить как одиночный прогон системы, так и запустить статистический анализ. Статистический анализ проводится методом Монте-Карло. Строится усредненный график доли зараженных узлов по времени эволюции для визуального анализа. Также рассчитываются три параметра: доля зараженных узлов при достижении насыщения вирусом, максимальная скорость распространения вируса и время до насыщения вируса. Момент насыщения вируса определяется как момент времени, до которого в течение заданного интервала не происходит дальнейшего роста количества зараженных узлов.

Первая версия системы в качестве протокола передачи сообщений использовала TCP/IP. В данном протоколе устанавливается соединение, затем передается сообщение. Метод требует подтверждения от принимающего узла о том, что сообщение было получено корректно. Данные особенности метода приводят

к тому, что передача сообщений занимает некоторое, пусть и небольшое, время. В первой версии системы данный метод использовался как для попытки заражения, так и для рассылки оповещений и назначения групп оповещения. Результаты статистического анализа представлены на рис. 2.

Во второй версии системы для передачи оповещений и назначения групп оповещения был использован протокол UDP. Особенностью протокола UDP является то, что он

использует простую модель передачи данных, без «рукопожатий» и подтверждений, что делает его значительно более быстрым. Целью исследования данного варианта системы было оценить на практике влияние выбора протокола на эффективность. Для попыток заражения по-прежнему использовался протокол TCP/IP, как наиболее широко распространенный протокол, используемый для взаимодействия в сетях. Результаты статистического анализа представлены на рис. 3.

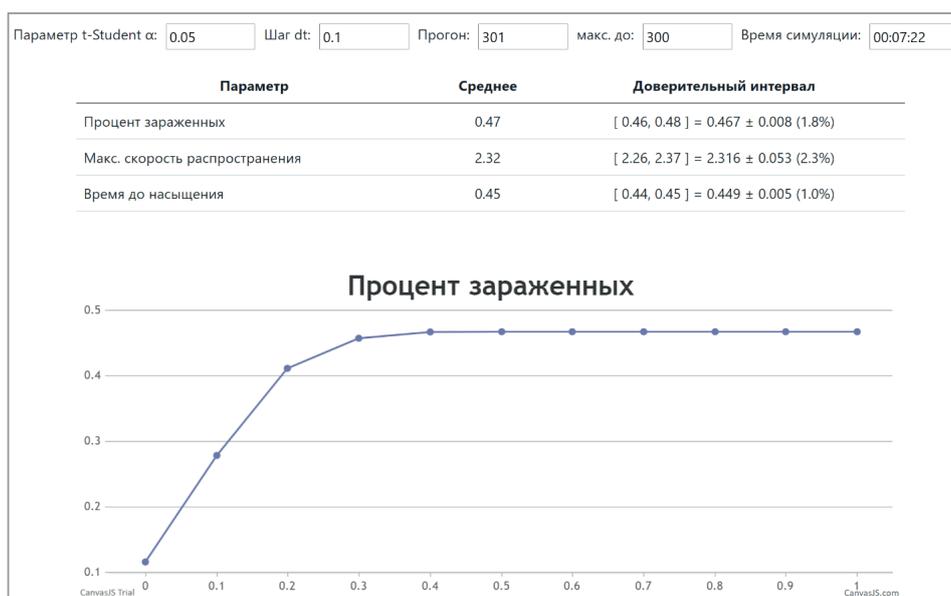


Рис. 2 Результаты статистического анализа реализации на Java стохастической коллаборационной защиты от вирусов с использованием только протокола TCP/IP

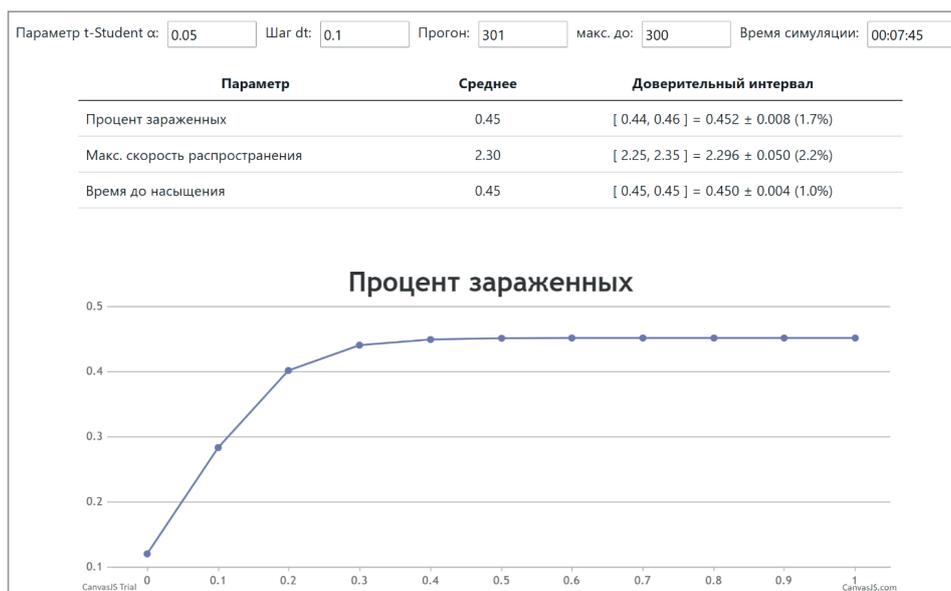


Рис. 3 Результаты статистического анализа реализации на Java стохастической коллаборационной защиты от вирусов с использованием протокола UDP для оповещений и назначения групп оповещения

Как видно из рис. 2 и 3, использование более быстрого протокола дает эффект за счет более быстрого информирования групп оповещения.

Статистический анализ модели с учетом задержек протокола TCP/IP

В [1] проводилось исследование математической модели данной системы защиты. Для получения более детальной оценки вклада задержек, связанных с использованием протокола TCP/IP, в спецификацию модели из [1], максимально приведенную в соответствие с реализацией, была введена задержка, экспоненциально распределенная, с математическим ожиданием, соответствующим значению, измеренному на прогонах реализации Java. Далее, был проведен статистический анализ системы с задержкой, связанной с использованием протокола TCP/IP, и системы

с минимальной задержкой в 1мс, так как оценить точно задержку, связанную с использованием протокола UDP, представляется затруднительным в виду отсутствия подтверждений о получении сообщений в данном протоколе. Результат анализа двух вариаций модели представлен на рис. 4.

Как видно из графика, протокол с минимальной задержкой оповещений (условно помеченный как протокол UDP*), показывает несколько лучший результат, чем протокол, полностью основанный на TCP/IP.

Также для уточнения влияния размера групп были проведены дополнительные исследования математической модели. Для случая 10 узлов был проведен анализ доли зараженных узлов в конце симуляции для групп размером от 1 (лишь один узел оповещается) до 10 (оповещаются все узлы). Результаты исследования представлены на рис. 5.

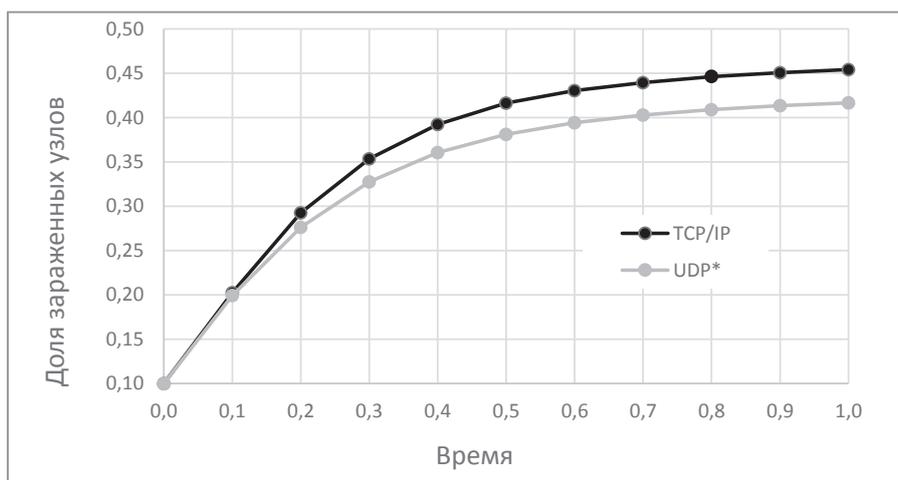


Рис. 4 Доля зараженных узлов по времени симуляции, полученный при анализе модели

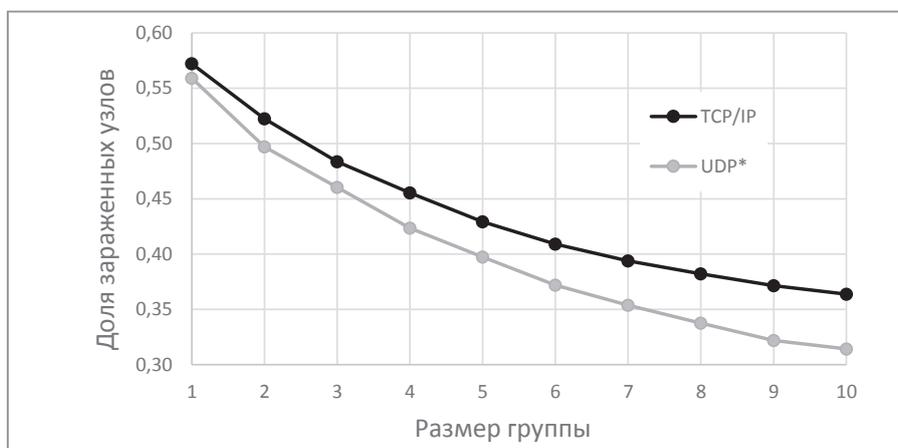


Рис. 5 Доля зараженных узлов в конце симуляции от размера групп, полученный при анализе модели

Как видно из графика, наблюдается линейный рост эффективности при увеличении размера группы. Реально выбираемый размер группы определяется максимально допустимой нагрузкой на сеть, вследствие увеличения количества сообщений, пересылаемых системой защиты при росте размера группы. Количество таких сообщений пропорционально количеству узлов, умноженному на размер группы.

Также, представляет интерес изучение эффективности системы в ситуации, когда размер группы является фиксированным фактором общего количества узлов, который назовем коллабационным фактором k_G . Тогда размер группы $G = k_G * N$, где N – общее количество узлов. Мы исследовали эффективность для оригинального $k_G = 0.4$, то есть $G = 0.4 * N$, использованный в [2]. При вариации общего количества узлов от 5 до 50 с шагом 5 был получен график зависимости доли зараженных узлов, представленный на рис. 6.

Как видно из графика, увеличение общего количества узлов повышает эффективность модели. Это объясняется тем, что, после полноценной реакции, система «изолирует» зараженные узлы в некотором объеме, после чего заражение прекращается.

Как было отмечено ранее, увеличение количества узлов может повышает количество сообщений, передаваемых системой защиты. Когда размер группы определяется фиксированным фактором, то общее количество передаваемых сообщений в единицу времени на узел может быть оценено сверху фактором

пропорциональным $m_{num} k_G * N$. Верхний предел линейно растет по количеству узлов. В системе с несколькими тысячами узлами, в некоторых сценариях заражения, может наблюдаться нагрузка на сеть, образованная оповещениями.

Данная нагрузка может быть устранена путем применения иерархического подхода к построению системы. Для преодоления роста количества узлов предлагается объединение узлов в кластеры. Внутри каждого кластера реализуется указанная система защиты. Один из узлов объявляется ведущим и отвечает за кластер. Возможны разные подходы к определению, что считать зараженным кластером. Можно положить, что кластер считается зараженным, если хотя бы один узел в кластере заражен. Коммуникация происходит между ведущими узлами, которые действуют от имени кластеров. Далее, рассмотрим кластеры более высоких уровней, состоящие из кластеров более низких уровней. Выберем ведущие узлы на кластерах более высоких уровней и реализуем аналогичную систему на каждом уровне.

Верхнюю оценку общего количества сообщений в системе в единицу времени на один узел можно подсчитать следующим образом. Пусть N_i – количество кластеров уровня i (N_0 обозначает количество узлов на нулевом уровне), k_G – групповой коэффициент, n – количество уровней. Тогда количество сообщений в системе в единицу времени на один узел будет пропорционально. Положим, что мы следуем схеме, в которой количество кластеров на всех уровнях одинаково и равно или меньше

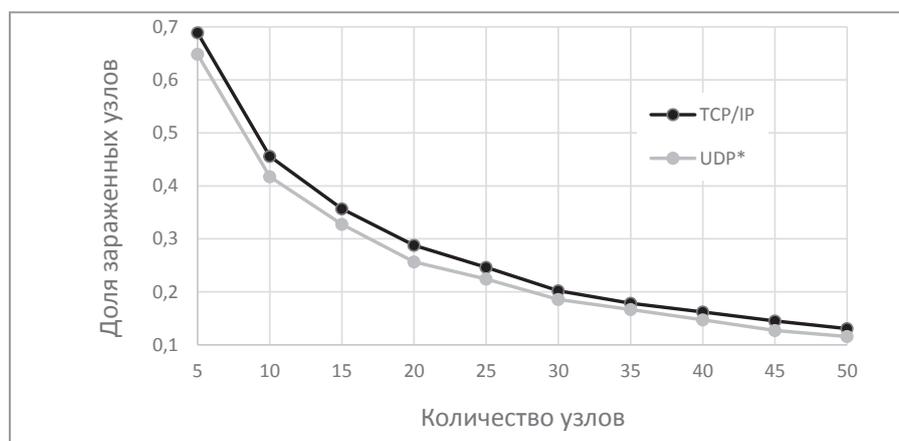


Рис. 6 Доля зараженных узлов в конце симуляции от общего количества узлов при фиксированном факторе размера группы, полученный при анализе модели

количества узлов на нулевом уровне $N_i N_0$. Тогда $m_{num} \leq k_G * n * N_0$, что значительно меньше аналогичной оценки для дизайна системы без использования иерархического подхода. Например, при $N = 2700$, $k_G = 0.4$ получаем размер группы в 1080 узлов и, как следствие, оценка будет равна 1080 для неиерархической системы. Однако при использовании описанного иерархического подхода с тремя уровнями, то есть $n = 3$, $N_0 = 30$, получаем оценку $m_{num} \leq 0.4 * 3 * 30 = 36$, что означает значительно меньшую нагрузку на сеть.

Заключение

В данной работе была описана апробация реализации коллаборационной стохастической системы защиты от вирусов в условиях, приближенных к реальным.

Было изучено две вариации алгоритма, с использованием протоколов TCP/IP и UDP в части рассылки оповещений об обнаружении вирусов и назначении групп оповещений.

Было установлено, что применение протокола UDP приводит к увеличению статистической эффективности системы защиты. Был исследован возможный потенциал увеличения эффективности за счет снижения задержек в доставке сообщений.

Было исследовано влияние размера группы оповещения и общего количества узлов, при сохранении в процентном соотношении размера групп. Было выяснено, что увеличение размера общего количества узлов приводит к заметному росту эффективности системы, однако для некоторых сценариев заражения, сопряжено с увеличением нагрузки на сеть ввиду одновременного увеличения количества оповещений в сети. Был предложен механизм иерархической организации системы защиты для предотвращения быстрого роста данной нагрузки.

Таким образом, предлагаемая система может использоваться для реальных задач защиты сетей, состоящих из произвольного количества узлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шарыкин, Р.Е. Применение Формальных Методов при Проектировании Коллаборационной Системы Противовирусной Защиты / Р.Е. Шарыкин, А.Н. Курбацкий // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. – 2020. – № 1. – С. 59–69.
2. Briesmeister, L. Microscopic simulation of a group defense strategy / L. Briesmeister, P. Porras // Proceedings of Workshop of Principles of Advanced and Distributed Simulation, Monterey, California, US, 1–3 June, 2005 /; eds.: D. Nicol [et al]. – Los Alamitos, California, US: IEEE Computer Society, 2005. – P. 254–261.
3. Briesmeister, L. Automatically deducing propagation sequences that circumvent a collaborative worm defense / L. Briesmeister, P. Porras // Proceedings of International Performance Computing and Communications Conference, Phoenix, Arizona, US, 10–12 April, 2006 /; eds.: D. Nicol [et al]. – Los Alamitos, California, US: IEEE Computer Society. – P. 587–592.
4. Шарыкин, Р.Е. Модель распределенных объектно-ориентированных стохастических гибридных систем / Р.Е. Шарыкин, А.Н. Курбацкий // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. – 2019, № 2. – С. 52–61.
5. Agha, G.A. PMaude: Rewrite-based specification language for probabilistic object systems / G.A. Agha, J. Meseguer, K. Sen // Electronic Notes in Theoretical Computer Science. – 2006. – Vol. 153, iss. 2, № 2. – P. 213–239.
6. Meseguer, J. Conditional rewriting logic as a unified model of concurrency / J. Meseguer // Theoretical Computer Science. – 1992. – Vol. 96, iss. 1. – P. 73–155.
7. Шарыкин, Р.Е. Верификация Распределенных Объектно-Ориентированных Стохастических Гибридных Систем / Р.Е. Шарыкин, А.Н. Курбацкий // Вестник Гродненского Государственного Университета имени Янки Купалы. Серия 2. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление. – 2019. – Том 9, № 3. – С. 123–132.
8. Sen, K. On statistical model checking of stochastic systems / K. Sen, M. Viswanathan, G. Agha // Lecture Notes in Computer Science. – 2005. – Vol. 3576. – P. 266–280.
9. Sebastio, S. MultiVeStA: Statistical model checking for discrete event simulators / S. Sebastio, A. Vandin // Proceedings of the 7th International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools, Torino, Italy, 10–12 December, 2013 / Brussels, Belgium: Institute for Computer Sciences; eds.: A. Horvath [et al]. – 2013. – P. 310–315.
10. Шарыкин, Р.Е. Реализация в среде Java коллаборационной системы защиты от вирусных атак. [Электронный ресурс] // GitHub: [сайт]. – Режим доступа: <https://github.com/shymaude>. – Дата доступа: 02.11.2021.

REFERENCES

1. Sharykin, R. Application of Formal Methods in the Design of a Collaborative Virus Defense System / R. Sharykin // Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika. Informatika. – 2020. – Vol. 1. – P. 59–69.

2. **Briesmeister, L.** Microscopic simulation of a group defense strategy / L. Briesmeister, P. Porras // Proceedings of Workshop of Principles of Advanced and Distributed Simulation, Monterey, California, US, 1–3 June, 2005 /; eds.: D. Nicol [et al]. – Los Alamitos, California, US: IEEE Computer Society, 2005. – P. 254–261.
3. **Briesmeister, L.** Automatically deducing propagation sequences that circumvent a collaborative worm defense / L. Briesmeister, P. Porras // Proceedings of International Performance Computing and Communications Conference, Phoenix, Arizona, US, 10–12 April, 2006 /; eds.: D. Nicol [et al]. – Los Alamitos, California, US: IEEE Computer Society. – P. 587–592.
4. **Sharykin, R.** A model of Distributed Object-Based Stochastic Hybrid Systems / R. Sharykin, A. Kourbatski // Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika. Informatika. – 2019. – № 2. – P. 52–61.
5. **Agha, G.A.** PMAude: Rewrite-based specification language for probabilistic object systems / G.A. Agha, J. Meseguer, K. Sen // Electronic Notes in Theoretical Computer Science. – 2006. – Vol. 153, iss. 2, № 2. – P. 213–239.
6. **Meseguer, J.** Conditional rewriting logic as a unified model of concurrency / J. Meseguer // Theoretical Computer Science. – 1992. – Vol. 96, iss. 1. – P. 73–155.
7. **Sharykin R.** Verification of Distributed Object-Oriented Stochastic Hybrid Systems. Systems / R. Sharykin, A. Kourbatski // Vestnik Grodnenskogo Gosudarstvennogo Universiteta imeni Yanki Kupaly. Seriya 2. Matematika. Fizika. Informatika, vychislitel'naya tekhnika i upravlenie. – 2019. – Vol. 9, № 3. – P. 123–132.
8. **Sen, K.** On statistical model checking of stochastic systems / K. Sen, M. Viswanathan, G. Agha // Lecture Notes in Computer Science. – 2005. – Vol. 3576. – P. 266–280.
9. **Sebastio, S.** MultiVeStA: Statistical model checking for discrete event simulators / S. Sebastio, A. Vandin // Proceedings of the 7th International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools, Torino, Italy, 10–12 December, 2013 / Brussels, Belgium: Institute for Computer Sciences; eds.: A. Horvath [et al]. – 2013. – P. 310–315.
10. **Sharykin, R.** Java implementation of the stochastic collaborative virus defense system [Electronic resource] // GitHub: [site]. – Mode of access: <https://github.com/shymaude>. – Date of access: 02.11.2021.

Поступила
02.11.2021

После доработки
30.11.2021

Принята к печати
01.12.2021

R. SHARYKIN

APPROBATION OF THE STOCHASTIC GROUP VIRUS PROTECTION MODEL

The article discusses the implementation in Java of the stochastic collaborative virus defense model developed within the framework of the Distributed Object-Based Stochastic Hybrid Systems (DOBSHS) model and its analysis. The goal of the work is to test the model in conditions close to the real world on the way to introducing its use in the practical environment. We propose a method of translating a system specification in the SHYMaude language, intended for the specification and analysis of DOBSHS models in the rewriting logic framework, into the corresponding Java implementation. The resulting Java system is deployed on virtual machines, the virus and the group virus alert system are modeled stochastically. To analyze the system we use several metrics, such as the saturation time of the virus propagation, the proportion of infected nodes upon reaching saturation and the maximal virus propagation speed. We use Monte Carlo method with the computation of confidence intervals to obtain estimates of the selected metrics. We perform analysis on the basis of the sigmoid virus propagation graph over time in the presence of the defense system. We implemented two versions of the system using two protocols for transmitting messages between nodes, TCP/IP and UDP. We measured the influence of the protocol type and the associated costs on the defense system effectiveness. To assess the potential of cost reduction associated with the use of different message transmission protocols, we performed analysis of the original DOBSHS model modified to model message transmission delays. We measured the influence of other model parameters important for the next steps towards the practical use of the model. To address the system scalability, we propose a hierarchical approach to the system design to make possible its use with a large number of nodes.



Шарыкин Роман Евгеньевич, соискатель кафедры технологий программирования факультета прикладной математики и информатики Белорусского государственного университета. Научные интересы: моделирование и анализ сложных систем, информационная безопасность, переписывающая логика.

Sharykin Raman Yauhenavich, aspirant of the Department of Software Engineering, Faculty of Applied Mathematics and Computer Science, Belarusian State University. Scientific interests: modeling and analysis of complex systems, information security, rewriting logic.

Email: sharykin@gmail.com

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
В ОБРАЗОВАНИИ**

**INFORMATION
TECHNOLOGIES
IN EDUCATION**

Н. Ф. ЗЕНЬЧУК¹, И. В. САЛТАНОВА²

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПОИСКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

¹ Институт бизнеса БГУ (Минск, Республика Беларусь)

² Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Сравнивается эффективность использования для поиска научно-технической информации глобальных поисковых систем, функционирующих в сети Интернет, и специализированных систем, в том числе Государственной системы научно-технической информации Республики Беларусь. Рассматриваются возможные достоинства и недостатки систем поиска НТИ. Анализируется опыт отдельных государств по созданию и обеспечению функционирования государственных ресурсов научно-технической информации.

Ключевые слова: Научно-техническая информация, ГСНТИ; системы поиска НТИ, эффективность.

Введение

В условиях экономики знаний научно-техническая информация (далее – НТИ) становится важным производственным ресурсом. В мировой практике систематизация и хранение НТИ осуществляется как на уровне государственных, так и на уровне коммерческих организаций.

По мере накопления НТИ усложняется задача по её поиску. Развиваются как глобальные системы поиска информации, так и специализированные информационные ресурсы, предназначенные для поиска и аккумуляции именно информации научно-технического характера.

В таких условиях актуальным является вопрос, целесообразно ли затрачивать средства на создание специализированных ресурсов для поиска НТИ либо целесообразно использовать имеющиеся в сети интернет глобальные поисковые системы.

Основная часть

1. Государственные ресурсы научно-технической информации

В ряде стран функционируют системы НТИ. Основными источниками информации для подобных систем, как правило, выступают институты, университеты, исследовательские фонды, библиотеки, государственные органы

и другие организации, как национального, так и международного уровня.

В качестве примера можно привести деятельность «Центра научно-технической информации США» (The National Technical Information Service – NTIS). Данная структура была создана после Второй мировой войны и была призвана накапливать НТИ, созданную с привлечением государственного финансирования. NTIS на текущий момент хранит более 3 млн. единиц документов по 350 отраслям, из них 600 тыс. доступны онлайн.

В ФРГ с 1970-х годов функционирует система тематических центров специальной информации – (Fachinformationszentrum – FIZ). В нее входят такие известные научно-информационные центры, как «FIZ Chemie», «FIZ Technik», «FIZ Karlsruhe (Energie, Physik, Mathematik)» и др. В 2000 годах федеральное Министерство образования и науки, а также Немецкий исследовательский фонд поддержали проект по интеграции распределенных электронных ресурсов информационных центров, научно-технических библиотек, университетов, научно-исследовательских институтов Германии, а также по обеспечению широкого доступа к полным текстам в едином интерфейсе на основе современных методов поиска. Первоначально проект был реализован в рамках создания научного портала «Vascoda».

Для национальных центров НТИ широко распространенной практикой является создание и сопровождение работы научных порталов. Так крупнейший во Франции «Центр научно-технической информации» (INIST) поддерживает работу подобного научного портала и генерирует базы данных (далее – БД), в том числе такие крупные, как БД «Francis», которая была основана в 1972 году и содержит 2,6 млн. записей по 15 дисциплинам, а также реферативная БД «Pascal», которая включает 20 миллионов ссылок и ведется с 1973 года. Кроме предоставления доступа к БД портал предлагает услуги по переводу статей на английский язык, продвижению публикаций, наукометрическим измерениям для ученых, присвоению DOI и пр. Система содержит более 700 тыс. записей.

Среди национальных агентств необходимо отметить «VTT» – Финский центр технических исследований». Здесь удалось создать одну из наиболее эффективных моделей трансфера готовых высокотехнологичных решений для бизнеса в области энергетики, экологии, инфраструктуры. Эффективность данной работы демонстрирует то, что в общем объеме инноваций в Финляндии более 30% инноваций были внедрены при содействии «VTT» [1].

В Республике Беларусь функционирует государственная система научно-технической информации (далее – ГСНТИ), целью которой является развитие и удовлетворение информационных потребностей в НТИ субъектов национальной инновационной системы [2]. В рамках ГСНТИ Республики Беларусь функционируют: республиканские информационные центры; библиотечная инфраструктура; отраслевые центры и службы НТИ; областные центры НТИ; система издания и распространения научно-технической литературы; информационно-телекоммуникационная инфраструктура [1].

2. Глобальные системы поиска информации и специализированные системы хранения и поиска НТИ

Для обеспечения поиска в Интернете необходимой пользователю информации в мировой практике получили развитие различные средства поиска, которые в зависимости от целей и задач поиска, используются по отдельности или в комбинации друг с другом.

По данным компании comScore, рейтинг по числу пользовательских запросов в поисковые системы составил [3]:

Google – 1 место, 114,7 миллиардов запросов (65,2%), абсолютный лидер;

Baidu – 2 место, 14,5 миллиардов запросов (8,2%), китайский поисковик;

Yahoo! – 3 место, 8,6 миллиардов запросов (4,9%);

Яндекс (Yandex) – 4 место, 4,8 миллиардов запросов (2,8%), основной конкурент Google среди русскоязычных поисковых систем, и вышел в конкуренты с другими поисковиками на мировом уровне;

Bing – 5 место, 4,5 миллиардов запросов (2,5%), поисковая система компании Microsoft.

Помимо глобальных поисковых систем в сети функционируют специализированные ресурсы для поиска научно-технической информации, которые носят коммерческий характер.

Достоинствами данных ресурсов являются удобство поиска НТИ относительная достоверность имеющейся в этих ресурсах информации. Недостаток данных ресурсов для поиска научно-технической информации заключается в ограниченности форм информации, а также преобладающий коммерческий характер предоставления НТИ.

3. Сравнение эффективности использования глобальных и специализированных систем для поиска НТИ

В современных условиях можно выделить пять основных категорий потребителей научно-технической информации: научно-исследовательский сектор, сектор образования и повышения квалификации, бизнес-сектор, система государственного управления, другие заинтересованные лица [3].

Среди основных требований, предъявляемых к НТИ можно выделить следующие:

– актуальность. Только вовремя полученная информация может принести пользу потребителям, после определенного промежутка времени информация становится не нужной (не актуальной) или не достоверной;

– достоверность. Показатель качества информации, означающий её полноту и общую точность;

– целостность. Состояние информации, при котором отсутствует любое её изменение, либо изменение осуществляется только преднамеренно субъектами, имеющими на него право.

К процессу поиска НТИ предъявляются следующие требования:

– оперативность. Время, затрачиваемое на выполнение поиска, с момента формирования задания и выдачи команды на производство поиска до момента получения его результатов;

– простота. Требования, определяющие минимальное владение инструментами для получения необходимой НТИ;

– полнота поиска. Количественная характеристика результатов информационного поиска, которая определяется путем деления количества выданных в результате выполнения поиска релевантных документов на общее число релевантных документов, имеющихся в информационно-поисковой системе (выданных и не выданных);

– релевантность. Характеристика степени соответствия смыслового содержания документа, найденного в результате поиска, содержанию информационного запроса.

Необходимо различать такие понятия как время, затрачиваемое системой на поиск НТИ и время, затрачиваемое пользователем в системе на поиск НТИ.

Время, затрачиваемое системой на поиск НТИ – это время, проходящее с момента отправки запроса пользователем на осуществление поиска необходимой ему НТИ до момента предоставления НТИ пользователю поисковой системой согласно заданным параметрам.

Время, затрачиваемое пользователем в системе на поиск НТИ – это общее время, затраченное непосредственно пользователем на осуществление поиска необходимой ему НТИ.

Например, при осуществлении поиска НТИ в Интернете время, затрачиваемое системой на поиск НТИ будет равно времени, затраченному пользователем в системе на поиск НТИ. Однако, при работе пользователя с ГСНТИ у него возникает возможность не только осуществлять поиск необходимой ему информации на ресурсах ГСНТИ, но и осуществлять запросы на доставку полных текстов по различным направлениям и тематикам. При этом

затраченное пользователем время в системе на поиск НТИ будет включать в себя составление и отправку запроса на необходимую ему НТИ. Но время, затрачиваемое системой на поиск НТИ будет включать в себя время на получение запроса и его обработку, время поиска системой НТИ и время отправки её пользователю. В итоге время, затрачиваемое пользователем на поиск НТИ минимизируется, а время, затрачиваемое системой на поиск НТИ, существенно увеличивается.

Для сравнения эффективности поиска НТИ в различных источниках авторами статьи было проведено исследование, которое включало в себя наблюдение за специалистами, осуществляющими научно-исследовательскую работу в учреждениях высшего образования и НИИ. В наблюдении приняло участие 15 специалистов.

На протяжении периода исследования при возникновении потребности в какой-либо НТИ наблюдаемые специалисты сначала обращались в ГСНТИ Республики Беларусь для поиска НТИ, а затем осуществляли поиск по тому же вопросу с использованием глобальных поисковых ресурсов. При этом замерялось время, затрачиваемое системой на поиск НТИ и время, затрачиваемое пользователем в системе на поиск НТИ.

Для определения направленности необходимой пользователям НТИ при проведении исследования, запросы были разделены на группы:

- библиографические – статьи, публикации, книги, монографии;
- научно-технические – патенты, изобретения, НИР, НИОКР;
- юридические – законы, постановления;
- направленные запросы единичного характера – расшифровка определений, сокращений или информация, которая носит поверхностный характер.

Результаты исследования приведены в табл. 1.

Исследование показало, что при использовании глобальных средств поиска специалисты смогли реализовать свою потребность в НТИ на 72,1%, в то время как при осуществлении поиска через ГСНТИ результативность составила 99,3%. Среднее затраченное время сотрудником на удовлетворение одного запроса информации через систему ГСНТИ составило

Т а б л и ц а 1. Результаты исследования по поиску

Наименование показателя	Глобальные поисковые ресурсы	ГСНТИ РБ
Кол-во проведенных запросов (всего) / Кол-во удовлетворённых запросов	1485/1072	1485/1475
в том числе:		
библиографический	987/588	987/977
научно-технический	29/21	29/29
юридический	98/92	98/98
направленный	371/371	371/371
Время, затраченное пользователем в системе на поиск НТИ	268 час. 5 мин. 20 сек.	161 час. 11 мин. 29 сек.
в том числе:		
библиографический	235 час. 1 мин. 15 сек.	147 час. 42 мин. 45 сек.
научно-технический	7 час. 38 мин. 8 сек.	3 час. 32 мин. 48 сек.
юридический	18 час. 17 мин. 30 сек.	4 час. 40 мин. 35 сек.
направленный	7 час. 8 мин. 27 сек.	5 час. 15 мин. 21 сек.
Среднее время, затрачиваемое пользователем в системе на поиск НТИ (в расчете на один удовлетворённый запрос)	15 мин. 0 сек.	6 мин. 33 сек.
в том числе:		
библиографический	24 мин. 18 сек.	9 мин. 4 сек.
научно-технический	21 мин. 59 сек.	7 мин. 20 сек.
юридический	11 мин. 55 сек.	2 мин. 51 сек.
направленный	1 мин. 10 сек.	51 сек.
Среднее время, затрачиваемое системой на поиск НТИ (в расчете на один удовлетворённый запрос)	15 мин. 00 сек.	41 мин. 5 сек.

6 мин. 33 сек., тогда как среднее значение через глобальные средства поиска составило 15 мин., что позволяет сэкономить пользователю на каждом поиске НТИ в среднем 8 мин. 27 сек. Однако, в ходе исследования было выявлено, что при осуществлении направленного поиска НТИ глобальная сеть Интернет незначительно уступает ГСНТИ в экономии времени, затрачиваемого в системе на поиск НТИ, – всего на 19 сек. (в расчете на один запрос) по сравнению с ГСНТИ.

Данное исследование показало слабые и сильные стороны ресурсов НТИ, которые приведены в табл. 2.

Как показало исследование для поиска информации имеющейся в глобальных поисковых ресурсах, необходимы навыки и знание информационных источников, т.к. множество ресурсов обладают низкой актуальностью и достоверностью по сравнению с ГСНТИ.

В табл. 3 отображается сравнение ресурсов поиска НТИ по предъявляемым требованиям.

Т а б л и ц а 2. Сравнение ресурсов согласно требованиям предъявляемым, к НТИ

Глобальные поисковые ресурсы	ГСНТИ РБ
Актуальность	
Информация не всегда является актуальной, что в свою очередь требует дополнительной проверок.	В большинстве случаев информация является актуальной.
Достоверность	
Необходимы навыки пользования сети для определения ресурсов с достоверной информацией.	Информация ГСНТИ в полной мере достоверна.
Целостность	
Информация предоставляется не всегда целостно, т.к. статьи не всегда пишутся специалистами.	Информация в основном обладает целостным характером.

Таблица 3. Сравнение ресурсов согласно требованиям, предъявляемым к поиску НТИ

Глобальные поисковые ресурсы	ГСНТИ РБ
Оперативность	
Оперативное получение ответа, особенно при осуществлении направленного поиска НТИ.	Задержка в получении ответа при осуществлении запроса.
Простота	
Простота формулирования запроса.	Имеет возможность функционировать по принципу «одно окно». Пользователю необходимо четко сформулировать запрос о необходимой ему информации.
Релевантность	
Поиск не всегда отображает ссылки на необходимую НТИ, что увеличивает общее время поиска для удовлетворения запроса НТИ. Однако в интернете имеются коммерческие ресурсы, которые могут снизить время поиска НТИ.	Информация в большей степени соответствует смысловому содержанию запроса НТИ. Информация распространяется на безвозмездной основе.

На сегодняшний день ГСНТИ, несмотря на все свои очевидные плюсы и качество систематизированных БД НТИ, имеет значительный недостаток, который проявляется в задержке, предоставляемой НТИ пользователю полных текстов по различным направлениям и тематикам. Однако, ведутся работы по увеличению интеграции ресурсов ГСНТИ в сеть Интернет, что, в свою очередь, расширяет возможности пользователей для осуществления поиска НТИ в сети Интернет.

Заключение

Сравнение эффективности поиска специалистами НТИ в ГСНТИ Республики Беларусь и в глобальных поисковых системах показало, что при осуществлении поиска НТИ через ГСНТИ Республики Беларусь среднее время, затрачиваемое пользователем в системе на поиск НТИ одного запроса, составило 6 минут 33 секунды. В то же время у глобальных ресурсов данный показатель составляет в среднем 15 минут, что более чем в два раза дольше, чем в ГСНТИ.

Это происходит за счет недостаточной актуальности, достоверности и целостности НТИ, хранимой в глобальных ресурсах, что

в свою очередь заставляет перепроверять найденную информацию, и это увеличивает время на поиск НТИ в системе. Кроме того, из-за специфики функционирования ГСНТИ, которая берет на себя часть временных издержек пользователя (обработка запроса, поиск необходимой НТИ), время, затрачиваемое пользователем в системе на поиск НТИ, сокращается. Однако при этом увеличивается время, затрачиваемое системой на поиск НТИ

При осуществлении взаимодействия пользователя с ГСНТИ для поиска необходимой ему НТИ, система позволяет сократить время, затрачиваемое пользователем в системе на поиск НТИ в среднем на 9 минут 58 секунд в расчёте на один запрос. Однако, при осуществлении направленных запросов НТИ ГСНТИ использовать не целесообразно.

Таким образом, использование специализированных систем поиска НТИ значительно экономит рабочее время пользователя, что в свою очередь напрямую позволяет повысить продуктивность его работы.

Данное исследование подтверждает необходимость создания и использования специализированных систем поиска научно-технической информации для экономии рабочего времени потребителей НТИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаревич, С. В. Основные направления совершенствования государственной системы научно-технической информации Республики Беларусь для обеспечения инновационного развития экономики / С.В. Макаревич // Научно-практический журнал «Новости науки и технологий». – 2020. – № 1 (52). – С. 43–51.
2. Портал государственного комитета по науке и технологиям [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gknt.gov.by/deyatelnost/opredelenie-gsnti.php>. Дата доступа: 05.09.2021.

3. Информационный ресурс comScore [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://distolymp2.spbu.ru/www/search/engines_r.html Дата доступа:02.09.2021.

REFERENCES

1. **Makarevich, S.V.** The main directions of improving the state system of scientific and technical information of the Republic of Belarus to ensure the innovative development of the economy. / S.V. Makarevich // Nauchno-prakticheskiy zhurnal «Novosti nauki i tekhnologii». – 2020. – № 1 (52). – S. 43–51.
2. National Science and Technology Portal of the Republic of Belarus [Electronic resource]. Rezhim dostupa: <http://www.gknt.gov.by/deyatelnost/opredelenie-gsnti.php>. Data dostupa:05.09.2021.
3. Information resource comScore [Electronic resource]. Rezhim dostupa: http://distolymp2.spbu.ru/www/search/engines_r.html Data dostupa:02.09.2021.

Поступила
19.11.2021

После доработки
23.11.2021

Принята к печати
01.12.2021

ZIANCHUK M. F.¹, SALTANOVA I. V.²

FEASIBILITY OF CREATION AND USE OF SPECIALIZED SEARCH SYSTEMS FOR SCIENTIFIC AND TECHNICAL INFORMATION

¹ School of Business of BSU, Minsk, Belarus

² Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

The efficiency of using global Internet search systems versus specialized systems, including the State System of Scientific and Technical Information of the Republic of Belarus, for searching the scientific and technical information is compared in this article. Potential advantages and disadvantages of STI search systems are considered. The experience of individual states in creating and maintaining the functioning of state resources of scientific and technical information is analyzed.

Keywords: Scientific and technical information, SSSI; STI search systems, efficiency.



Зеньчук Николай Федорович, кандидат технических наук, доцент кафедры логистики, Институт бизнеса БГУ. Научные интересы – экономика знаний, логистика.

M. F. Zianchuk, associate Professor of the Department of Logistics, Candidate of Technical Sciences, School of Business of BSU, Minsk, Belarus.

E-mail: ZenchukNF@mail.ru



Салтанова Ирина Вильевна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Информационные технологии в управлении», МИДО, БНТУ. Научные интересы – экономика знаний, прогнозирование инновационного развития.

Irina Saltanova, head of the Department of Information Technologies in Management International Institute of Distance Education, Candidate of Technical Sciences, Belarusian National Technical University.

E-mail: saltanova@bntu.by

