

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИКЛАДНАЯ ИНФОРМАТИКА

№ 2, 2020



SYSTEM ANALYSIS AND APPLIED INFORMATION SCIENCE

No 2, 2020

**Международный
Научно-технический журнал**

Издается с декабря 2012 года

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет

Главный редактор

Сергей Васильевич Харитончик

Редакционная коллегия

В. Ф. Голиков (зам. главного редактора),
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),
Э. Г. Лазаревич, В. А. Липницкий, А. А. Лобатый,
Е. И. Никифорович (Украина),
А. А. Прихожий, И. А. Сатикив, В. В. Старовойтов,
П. П. Урбанович, А. Патрин (Польша),
Ю. Н. Петренко (ответственный секретарь),
Н. Н. Ташатов (Казахстан), 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. Golikov (deputy editor-in-chief),
V. Bogush, T. Borbotko, V. Baiburin (RF),
D. Bolshakov (RF), N. Gurskiy, L. Gerasimovich,
J. Zaharik, I. Kalyaev, G. Kipiani (Georgia),
E. Lazarevich, V. Lipnitsky, A. Lobaty,
E. Nikiforovich (Ukraine),
A. Prihozhy, I. Satikov, V. Starovoytov,
P. Urbanovich, A. Patrin (Poland),
Y. Petrenko (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) | ❖ EBSCO |
| ❖ Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU | ❖ BASE Search |
| ❖ Электронно-библиотечная система (ЭБС) издательства Лань | ❖ OpenAIRE |
| ❖ DOAJ https://doaj.org/toc/2414-0481 | ❖ WorldCat |
| ❖ Google Scholar | ❖ OpenDOAR |
| ❖ Киберленинка | ❖ ROAR |

Ответственный секретарь редакции

Петренко Ю. Н.

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

Y. Petrenko

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 01.07.2020. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 10,0. Уч.-изд. л. 3,91. Тираж 100 экз. Заказ 394.

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Трифонов Н. Ю., Ливинская В. А., Коржуков В. В. Регрессионная модель оценки автомобилей на основе парсинга интернет-данных	4
--	---

УПРАВЛЕНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Вишняков В. А., Аль-Масри А. Х., Аль-Хаджи С. Х. Организация структур и управления в локальных сетях интернет вещей	11
---	----

Коваленко А. М., Шейников А. А. Модель инерциально-оптической навигационной системы беспилотного летательного аппарата	17
--	----

Лобатый А. А., Яцына Ю. Ф., Прохорович С. С., Хвитко Е. А. Идентификация упрощенной математической модели беспилотного летательного аппарата	26
---	----

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

Голуб Ю. И., Старовойтов Ф. В., Старовойтов В. В. Влияние уменьшения размеров изображения на вычисление оценки его качества	35
---	----

Демешко В. С., Фёдоров А. И. Применение сверточных нейронных сетей в подсисте- ме разведки комплексной системы безопасности	46
---	----

Донг С. Ч., Ионин В. С. Организация хранения и поиска образа лица в объектно-ориентированной базе лиц	54
---	----

Прихожий А. А. Синтез параллельных сумматоров по if-диаграммам решений	61
--	----

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Сидоренко А. В., Шакинко И. В. Цифровые водяные знаки, формируемые с исполь- зованием дискретных хаотических отображений	72
--	----

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ОБРАЗОВАНИИ

Беляев В. П., Щур Д. С., Ширко С. В. Использование flash-технологии в образовательном процессе подготовки инженера-электромеханика	78
--	----

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS

Trifonov N. Yu., Livinskaya V. A., Korzhukov V. V. Regression model for car valuation based on internet data parsing	4
--	---

MANAGEMENT

OF TECHNICAL OBJECTS

U. A. Vishniakou, Al-Masri, A. H., Al-Haji, S. K. Organization of management and structure in local networks internet of things	11
---	----

Kovalenko A. M., Shejnikov A. A. Model of the inertial and optical navigation system of the unmanned aerial vehicle	17
---	----

Lobaty A. A., Yatsyna Y. F. Prohorovith S. S., Hvitko E. A., Identification of a simplified mathematical model of an unmanned aerial vehicle	26
---	----

DATA PROCESSING
AND DECISION-MAKING

Golub Y. I., Starovoitov F. V., Starovoitov V. V. Impact of image size reducing for image quality assesment	35
---	----

Demeshko V. S., Fedorov A. I. Application of convolutional neural networks in the intelligence security system subsystem	46
--	----

Dong X. C., Ionin V. S. Using object-oriented databases in face recognition	54
--	----

Prihozhy A. A. Synthesis of parallel adders from if-decision diagrams	61
--	----

INFORMATION SECURITY

Sidorenko A. V., Shakinko I. V. The digital watermarking algorithm using discrete chaotic maps	72
--	----

INFORMATION TECHNOLOGIES
IN EDUCATION

Belyaev V. P., Shchur D. S., Shirko S. V. Using flash technology in educational process training of an electrical engineer	78
--	----

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

SYSTEM ANALYSIS

Н. Ю. ТРИФОНОВ¹, В. А. ЛИВИНСКАЯ², В. В. КОРЖУКОВ²

РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ АВТОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПАРСИНГА ИНТЕРНЕТ-ДАННЫХ

¹ Белорусский государственный экономический университет

² Белорусско-Российский университет

Описываются результаты эконометрического моделирования рыночной стоимости на примере автомобилей класса В на основе сбора с помощью программы-парсера информации с популярного интернет-сайта. Полученная модель в виде двух статистически значимых регрессионных уравнений предназначена для использования в практике оценочной деятельности.

Ключевые слова: легковые автомобили; оценочная деятельность; парсер сайтов; рыночная стоимость; уравнение регрессии; эконометрическая модель

Введение

Оценка стоимости автомобилей, находящихся на вторичном рынке, в настоящее время становится всё более востребованной. Это происходит, в первую очередь, из-за стремительного расширения этого рынка. Заказчиками в оценке выступают как физические лица (например, конкретный покупатель или продавец подержанного автомобиля) так и организации, нуждающиеся в оценке транспорта для различных целей. Информация об остаточной стоимости дорожного транспортного средства (автомобиля) востребована при его купле-продаже, постановке на учёт, оценке или переоценке основных средств предприятия, при передаче в залог, при оценке ущерба в результате дорожно-транспортного происшествия, при разводе супругов и иных имущественных спорах, в том числе для нужд судебной экспертизы [1–2]. Набирающая популярность программа покупки старых автомобилей по системе «trade-in» тоже предполагает владение актуальной рыночной информацией о его цене.

Развитость рынка подержанных автомобилей в странах ЕАЭС позволяет использовать для оценки статистические методы сравнительного подхода к оценке стоимости [2–3]. Выборки в несколько десятков объектов сравнения позволяли получать достаточно надёжные результаты. Тем не менее, с развитием информационных технологий стали создаваться более

объёмные базы данных на интернет-порталах и сайтах, а также появились инструменты (т.н. парсеры) формирования на основе интернет-данных выборок с заданными характеристиками. Современные технологии позволяют собирать информацию с сайтов-агрегаторов объявлений для её дальнейшего использования. Это позволило поставить задачу эконометрического моделирования рыночной стоимости подержанного автомобиля, обладающего конкретными характеристиками. Для этого необходимо рассмотреть представительные выборки автомобилей различных классов, поскольку ранее [3] было показано, что параметры обесценивания со временем существенно зависят от класса исследуемого автомобиля.

Данная статья посвящена описанию методики и результатам эконометрического моделирования средней цены на вторичном рынке на примере автомобилей, относящихся к одному из наиболее популярных классов – В (т.н. бизнес-класс).

Исходные данные

Сбор первичной информации (row data) занимает обычно до 70% всего времени, потраченного на моделирование. В данном исследовании он осуществлялся с помощью парсера Selenium WebDriver – инструмента для сбора информации с сайта AUTO.ru, содержащего на момент сбора около 560 000 объявлений о продаже.

В результате анализа выборки из 17742 объявлений (рассматривался город Москва, как наиболее интересный для белорусов сегмент российского рынка) было обнаружено, что 97,7% автомобилей имеют возраст до 36 лет (с 1983 по 2019 годы). Дальнейший анализ проводился по объявлениям для автомобилей с 1983 по 2019 годы выпуска. Группировка по классам и годам этих автомобилей представлен в таблице 1.

Распределение в выборке по возрасту следующее. Больше всего представлено автомобилей, возраст которых не более 7 лет (53%). Автомобилей, возраст которых от 7 до 17 лет, на рынке около 22%, от 17 до 27 лет – 18% и от 27 до 37 лет всего 7%.

Распределение в выборке по классам следующее. Больше всего присутствуют автомобили классов J (43%) и B (24%), причем 55% автомобилей класса B имеют срок эксплуатации от 17 до 27 лет. Следующий по представительности – класс C, 54% автомобилей этого класса имеют возраст от 7 до 17 лет, 41% автомобилей моложе 5 лет. Автомобили остальных классов в основном (80% и выше) эксплуатировались до 7 лет.

Регрессионный анализ

В настоящей статье описано моделирование рыночной стоимости автомобиля на основе объявлений о продаже автомобилей класса B. В качестве инструмента анализа используется программа Statistica-7.

Первый шаг в анализе данных – визуализация. Очевидно, цена авто на вторичном рынке сильно зависит от возраста автомобиля. На рис. 1 представлено корреляционное поле для предиктора «цена» (в российских рублях) и одного из количественных регрессоров – «возраст» (автомобиля в годах) для класса B. В этом графике учтено, что из выборки были предварительно удалены результаты некоторых аномальных наблюдений для автомобилей возрастом до 10 лет.

Для отбора категориальных факторов строились частотные таблицы. Выяснилось: 53,3% автомобилей в выборке имеют задний привод и 46,53% – передний привод; 99,5% автомобилей в выборке имеет механическую коробку передач (присутствовали также автоматическая и роботизированная коробки передач); 96,93% автомобилей в выборке имеют бензиновый двигатель.

Т а б л и ц а 1 – Результат выборочного наблюдения объявлений о продаже автомобилей на вторичном рынке (единиц)

Год выпуска	Класс									Всего
	A	B	C	D	E	F	J	M	S	
1983–1991	7	528	301	207	79	10	37	11	2	1182
1992–2001	98	2138	411	427	48	18	56	16	9	3221
2002–2011	114	1465	784	151	89	95	960	78	57	3794
2012–2019	11	273	249	612	948	500	6013	340	184	9137
Всего	223	3876	1444	1190	1085	613	7029	434	250	16152

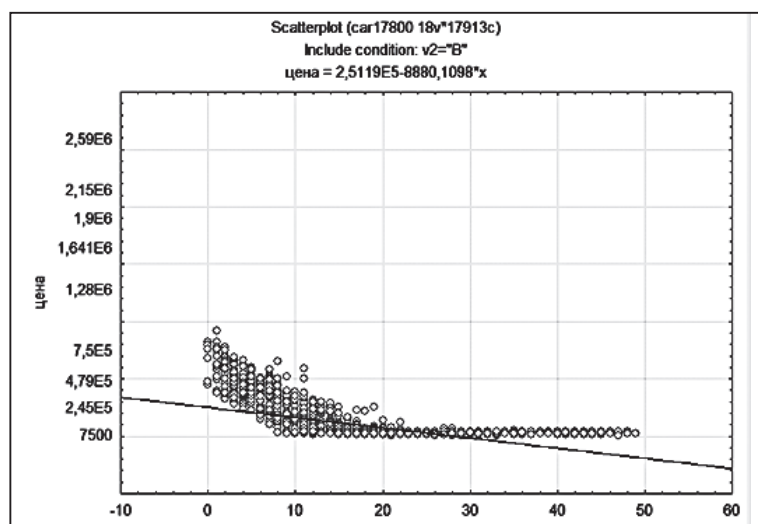


Рис. 1 – Корреляционное поле «цена»-«возраст» для анализируемой выборки

В качестве инструмента моделирования применялся множественный регрессионный анализ, реализованный в программе Statistica-7. На первом этапе был произведен отбор наиболее значимых признаков (feature selection), в модуле Data Mining. Он позволил сделать выводы о включения в модель тех же факторов, что и частотный анализ.

Для использования информации, содержащейся в категориальных факторах, применялся аппарат фиктивных (или, как их ещё называют, скалярных) переменных [4–5]. Для доказательства статистических различий у объектов с различными значениями категориальных признаков был использован программный модуль Nonparametrics.

Так, для разделения всей совокупности объявлений на два класса по возрасту (до 10 лет и более) была введена бинарная переменная «возраст». На рис. 2 приведен результат сравнения цены в двух выборках с помощью непараметрического критерия Колмогорова. Нулевая гипотеза об отличии различий в средней остаточной стоимости автомобилей обеих групп отвергается на уровне значимости 0,05.

Аналогичные исследования были проделаны и для других признаков (фиктивных переменных): «производитель» (бинарная переменная «страна», равная 1 при производстве автомобиля в России, 0 – в противном случае), «коробка передач» (бинарная переменная FKOR(мех), равная 1 для автомобиля с механической коробкой передач, 0 – в противном случае), «привод» (бинарная переменная FPRIV(задний), равная 1 для автомобиля с задним приводом, 0 – с передним), «тип топлива» (бинарная переменная, равная 1 для автомобиля с бензиновым двигателем, 0 – для автомобиля с дизельным).

Факторы были проранжированы по степени влияния на результативный признак (цена) с помощью F-критерия. Наибольшее влияние оказывает фактор «производитель», далее по степени влияния – «возраст», «коробка передач», «мощность», «привод».

В целом анализ значимости различных факторов приведен на рис. 3.

Поскольку возраст автомобиля – это единственный параметр, изменение которого

вызывает изменение цены конкретной модели на вторичном рынке, для спецификации регрессионной модели было, помимо исследования связи «цена»–«возраст», дополнительно построено корреляционное поле для предиктора «логарифм цены» и регрессора «возраст». Окончательный выбор был сделан в пользу полулогарифмической модели. Результат оценки выборки представлен ниже на рис. 4. Полученное уравнение является статистически значимым ($p < 0,05$). Величина коэффициента детерминации $R^2 = 0,86$ показывает, что около 86% вариации средней цены предложения автомобилей класса В определяется именно вариацией выбранных факторов.

Для окончательного вывода о возможности использовать модель для предсказания средней цены на рынке проведен анализ остатков на нормальное распределение (в соответствии с предпосылками МНК Гаусса-Маркова). Гистограмма остатков (рис. 5) позволяет не отвергать гипотезу о нормальности остатков.

Также была проверена гипотеза об отсутствии гетероскедастичности с помощью графического анализа остатков. Зависимость между возрастом и вектором остатков не наблюдалась, что позволило не отклонять эту гипотезу.

Как итог, для предсказания стоимости автомобилей класса В, согласно сложившейся конъюнктуре цен предложения, может быть использована следующая модель:

$$\ln(\text{цена}) = 12,61 - 0,9 \times \text{страна} - 0,9 \times \text{возраст} - 0,094M - 0,3FKOR - 0,2 \times FPRIV.$$

При этом

$$\text{страна} = \begin{cases} 1, & \text{если автомобиль производства РФ,} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

M – мощность двигателя в лошадиных силах;

возраст – в годах (разность между 2019 и годом выпуска авто);

$$FKOR = \begin{cases} 1, & \text{если у автомобиля механическая} \\ & \text{коробка передач,} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$FPRIV = \begin{cases} 1, & \text{если у автомобиля задний привод,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

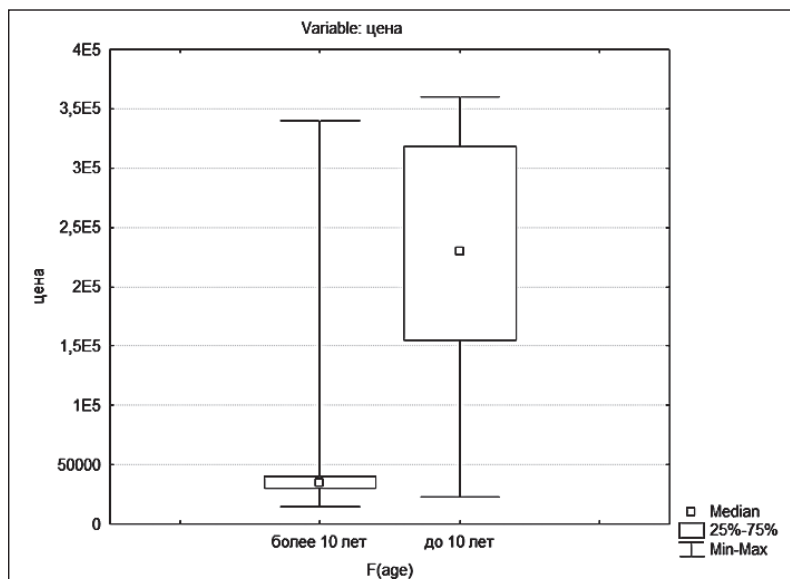


Рис. 2 – Сравнение статистической значимости различия средней цены автомобилей в выборках с возрастом до и после 10 лет

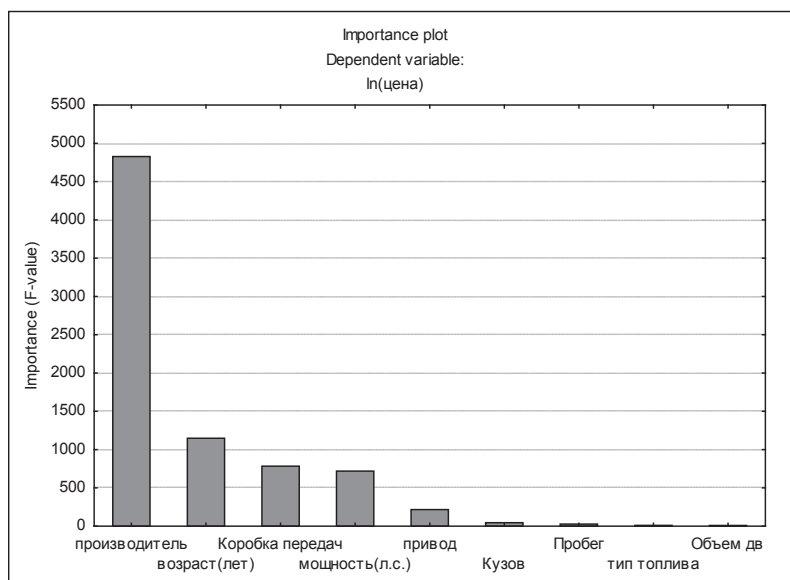


Рис. 3 – Сравнение факторов по силе влияния на результат по F-критерию

Regression Summary for Dependent Variable: ln(цена) (dCAR.sta)						
R= ,92784345 R²= ,86089346 Adjusted R²= ,86062450						
F(5,2586)=3200,8 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,34615						
Include condition: v6<=20						
N=2592	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(2586)	p-level
Intercept			12,61863	0,085479	147,6226	0,000000
страна	-0,329865	0,010979	-0,90468	0,030112	-30,0438	0,000000
возраст(лет)	-0,468925	0,010473	-0,09420	0,002104	-44,7760	0,000000
М(л.с.)	0,164393	0,010881	0,00951	0,000630	15,1080	0,000000
FKOR(мех)	-0,076684	0,009865	-0,30444	0,039166	-7,7733	0,000000
F(PRIV(задний))	-0,106280	0,007907	-0,20363	0,015150	-13,4415	0,000000

Рис. 4 – Регрессионное уравнение для логарифма средней цены предложения автомобилей бизнес-класса на вторичном рынке

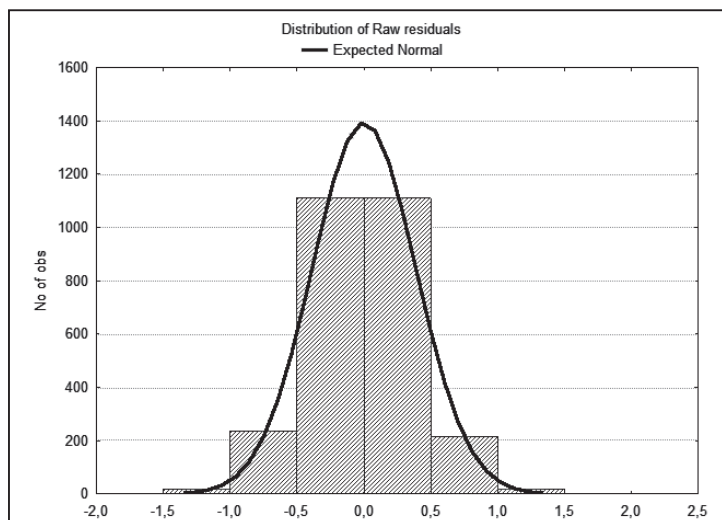


Рис. 5 – Демонстрация соответствия остатков нормальному распределению

Заключение

Таким образом, с помощью современных информационных технологий для автомобилей класса В была получена эконометрическая модель рыночной стоимости в зависимости от возраста и других ценообразующих

характеристик в виде регрессионного уравнения, использование которой в практике оценочной деятельности позволяет существенно повысить достоверность расчётов и уменьшить их трудоёмкость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка стоимости машин, оборудования и транспортных средств: учебник / А. П. Ковалев [и др.]. – Москва: Интерреклама, 2003. – 488 с.
2. Трифонов, Н. Ю. Теория оценки стоимости: учебное пособие / Н. Ю. Трифонов. – Минск: Вышэйшая школа, 2017. – 208 с.
3. Трифонов, Н. Ю. Характеристика накопленного износа автомобилей методами финансовой математики / Н. Ю. Трифонов, С. В. Скрыган // Белорусский экономический журнал. – 2014. – № 3. – С. 133–143.
4. Трифонов, Н. Ю. Применение регрессионного анализа в сравнительном подходе оценки недвижимости в условиях переходной экономики / Н. Ю. Трифонов, С. А. Шимановский // Бухгалтерский учёт и анализ. – 2002. – № 4. – С. 44–52.
5. Ливинская В. А. Использование фиктивных переменных в прикладном регрессионном анализе вторичного рынка автомобилей / Ливинская В. А., Чегерова Т. И. // Государство и право: актуальные проблемы формирования правового сознания: сборник статей II Международной научно-практической конференции, 30 ноября 2018 г., г. Могилев: МГУ имени А. А. Кулешова, 2019. – С. 36–39.

REFERENCES

1. Machinery, equipment and vehicles valuation: manual / A. P. Kovalev [a.o.]. – Moscow: Interreklama, 2003. – 488 p.
2. Trifonov, N. Yu. Theory of valuation: tutorial / N. Yu. Trifonov. – Minsk: Vysheyshaya shkola, 2017. – 208 p.
3. Trifonov, N. Description of vehicles' accumulated depreciation by financial mathematics techniques / N. Trifonov, S. Skrygan // Belarusian Economic Journal. – 2014. – № 3. – P. 133–143.
4. Trifonov, N. Yu. The use of regression analysis in a comparative approach to real estate valuation in transition economy / N. Yu. Trifonov, S. A. Shimanovsky // Accounting and Analysis. – 2002. – № 4. – P. 44–52.
5. Livinskaya V. A. Use of fictitious variables in applied regression analysis of the secondary car market / Livinskaya V. A., Chegerova T. I. // State and law: actual problems of legal consciousness formation: collection of articles of the II International scientific and practical conference, November 30, 2018. – Mogilev: Kuleshov Mogilev State University, 2019. – P. 36–39.

Поступила
10.04.2020

После доработки
10.05.2020

Принята к печати
01.06.2020

TRIFONOV N. Yu.¹, LIVINSKAYA V. A. ², KORZHUKOV V. V. ²

REGRESSION MODEL FOR CAR VALUATION BASED ON INTERNET DATA PARSING

¹ Belarus State Economic University

² Belarusian-Russian University

The results of econometric modeling of market value are described on the example of class B cars based on the collection of information from a popular website using a parser program. The resulting model in the form of two statistically significant regression equations is intended for use in the valuation practice.

Keywords: cars; econometric modeling, market value, site parser, statistical regression, valuation.



Трифонов Николай Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, почётный оценщик Республики Казахстан, доцент БГЭУ, председатель Белорусского общества оценщиков. Научные интересы – теория оценки стоимости, экономика предприятий, методы статистического моделирования.

Trifonov Nikolai Yurievich – PhD (Phys.-Math.), Docent, Honorary Appraiser of the Republic of Kazakhstan, Associate Professor of Belarus State Economic University, Chairman of the Belarusian Society of Valuers. His research interests focus on valuation theory, business microeconomics, statistical modeling methods.



Ливинская Виктория Александровна – кандидат физико-математических наук, доцент. Научные интересы – прикладная статистика и эконометрика, машинное обучение, анализ медицинских данных, наука о данных.

Livinskaya Victoriya Alexandrovna – PhD (Phys.-Math.), Docent. His research interests focus on applied statistics and econometrics, machine learning, medical data analysis, data science.



Коржуков Владимир Витальевич – младший инженер по автоматизации тестирования программного обеспечения в компании EPAM Systems, магистрант по специальности «Системный анализ и управление обработкой информации». Научные интересы – теория оценки стоимости, методы статистического моделирования.

Korzhukov Vladimir Vitalievich – Junior Software Test Automation Engineer at EPAM Systems, undergraduate in «System Analysis and Information Processing Management». His research interests focus on valuation theory, statistical modeling methods.

Работа выполнена в рамках работы над научной темой государственного бюджетного финансирования Республики Беларусь ГБ 17–200 «Теоретические, методические и практические вопросы оценки стоимости в условиях современного рынка».

**УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ**

**MANAGEMENT OF
TECHNICAL OBJECTS**

U.A. VISHNIAKOU, AL-MASRI, A.H., AL-HAJI, S.K.

ORGANIZATION OF MANAGEMENT AND STRUCTURE IN LOCAL NETWORKS INTERNET OF THINGS

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

Internet of Things (IoT) symbolic formula is given. The analysis of management technologies both in the network structures of infocommunications, based on the NSMP, and on local networks of the IoT. Two approaches for implementing the management process in infocommunication networks are shown: one is based on creating special software tools, the second is based on the working with data describing the network device. The basic operations of SNMP are given. Four levels of IoT in local network structure are described: smart sensors, network vehicles, services, and applications. Structure of local network of IoT which includes smart sensors, transport environment, services and applications information representation in network use semantic web are considered.

The structure of multi-agent system (MAS) of milk farms analyzing in Lebanon (MASMFA) for monitoring of production quality. MASMFA structure has many agents such as quality milk sensors, agents of communications, data base, analysis of the information received from sensor agents, decision-making. This system implements the functions to ensure the required class of milk quality and based on IoT local network construction. The information algorithm processing in such IoT is proposed. Milk sensor shell be periodically queried, their values will be recorded in the server database. The decision-making subsystem will issue data on milk quality to the farm administrator on a mobile device. The server structure will be implemented using a cloud service. Implementation this Internet of things network is being developed using LTE technology.

Key words: network management, Internet of things, smart sensors, transport networks, services, applications, structure

Introduction

The Internet of things is based on three basic principles. First, the ubiquitous communication infrastructure, second, the global identification of each object, and third, the ability of each object to send and receive data via a personal network or Internet to which it is connected. In its most general form from an infocommunication point of view, in which Internet of things can be written as the following symbolic formula [1]:

$$IoT = Sensors + Data + Networks + Services$$

The Internet of things is a global network of computers, sensors, and executive devices that communicate with each other using Internet Protocol (IP). To solve a specific application task, the server communicates via Internet with a group of small devices that have various sensors connected to them [2–3].

To build a practical local Internet of things system, consider the management organization, structure, and modeling tools of IoT [4–5].

Management technology in network structures

There are two main approaches to implementing the management process in

infocommunication networks: the first one is based on creating and using special software tools for managing a specific network device; the second is based on the working with data describing the network device [6, 7]. In this case, the data stream is used as the impact, not the control stream. The data flow, in contrast to the control flow, allows to build a more universal, although more limited in its capabilities, management model. Its main advantage is its independence not only from the OS, but also from the specific hardware implementation of the managed device. In order to create a unified approach to managing equipment connected to IP networks, the Simple Network Management Protocol (SNMP) was developed. From the management point of view, the entire network can be divided into a management system and management objects. The control system includes a set of computing tools designed to generate control actions and analyze information on the basis of which a decision on management is made. Management objects are resources that need to be managed (active network equipment, workstations, servers, etc.).

The control system consists of a control station and a set of auxiliary tools (probes, analyzers,

applications, etc.). Usually, the control station is a fairly powerful computer with specialized software. An important element of the control station is the description of the control objects (the station itself can act as a control object). In SNMP-compatible management objects, a special software module is implemented, which is called an agent. Agents collect information about the managed devices they work on and make this information available to network management systems (NMS) using the SNMP. The basic concept of SNMP is that all information necessary for device management is stored on the device itself (it can be a server, modem, or router) in Management Information Base (MIB). SNMP, as a direct network protocol, provides only small set of commands for working with MIB variables. In order to monitor the operation of a certain network device, it simply need to access its MIB, which is constantly updated by the device itself, and analyze the values of necessary variables. SNMP technology consists of three parts:

- Structure of Management Information (SMI);
- Management Information Base (MIB);
- SNMP itself, which defines the rules of interaction between the Manager and agents.

The control information structure defines the rules for describing this information. The formal description of objects is performed using the Abstract Syntax Notation One (ASN 1) language. To set the name of an object, just specify its identifier (Object Identifier), which is a sequence of integers. All identifiers are organized as leaves of a large tree. At the top level of the tree, there are three main nodes: iso, ccitt, and joint-iso-ccitt, which belong to different standard organizations. The iso subtree contains the org identifier (a node that is the root of various organizations subtrees), one of whose sub-nodes is the Department of Defense (DOD). It is believed, although not officially recorded, that the first node in DoD subtree is Internet. Thus, the «internet» object has the ID «1.3.6.1»: internet OBJECT IDENTIFIER:: = {iso(1) org (3) dod(6) 1}.

The SNMP is a simple request–response protocol. SNMP messages are embedded in UDP datagrams. The basic operations of SNMP:

- Get_request – get the value of the specified variable or information about the state of the network element;

- Get_next_request – get the value of a variable without knowing its exact name (the next logical identifier in the MIB tree);

- Set_request – assign the appropriate value to the variable. Used to describe the action to be performed;

- Get_response – response to commands: Get_request, Get_next_request, and Set_request. It also contains status information (error codes and other data);

- Trap – response of a network object to an event or state change.

Management levels in network of IoT

Recommendation Y.2060 provides an Internet of Things (IoT) reference model that is very similar to the NGN model and also includes four basic horizontal levels) [8]. There are four levels of management in the IoT network: the application level; the support level for applications and services; the network level; and the device level (sensor + handler).

The IoT application level is not considered in detail in Recommendation Y. 2060. The application and service support layer includes capabilities for various IoT objects to process and store data, as well as capabilities required for certain IoT applications or groups of such applications.

The network layer includes network capabilities (access and transport network resource management, mobility management, authorization, authentication, and billing functions, AAA) and transport capabilities (providing network connectivity for transmitting IoT application information and services). The device layer includes the device's capabilities for retrieving information, pre-processing it, and gateway capabilities.

The capabilities of the device include direct exchange with the communication network, exchange through the gateway, exchange through the wireless dynamic ad-hoc network, as well as temporary stop and resume operation of the device for energy saving. The gateway features support multiple interfaces for devices (CAN bus, ZigBee, Bluetooth, Wi-Fi, etc.) and for access/transport networks (3G, LTE, DSL, etc.). Another feature of the gateway is support for protocol conversion, if the protocols of the device and network interfaces differ from each other [8].

There are also two vertical levels, the management level and the security level, covering all

four horizontal levels. Vertical operational management capabilities include managing the consequences of failures, network capabilities, configuration, security, and billing data.

The main objects of management are devices, local networks and their topology, traffic and congestion on networks. The capabilities of the vertical security level depend on the horizontal level. The AAA functions, antivirus protection, and data integrity tests are defined for the application and service support level. For the network layer, there are options for authorization, authentication, and information protection of alarm protocols. At the device level, there are authorization, authentication, access control, and data privacy features.

In this case, the leading role is played by devices that can collect various information and distribute it over communication networks in various ways: through gateways and through the network; without gateways, but through the network; directly among themselves. Devices can have full-fledged control processors for processing data in the form of a «system-on-a-chip», including their own OS, a sensor / sensing unit for the environment, and a communication unit.

Structure of local network of IoT

The Internet of things belongs conceptually to the next generation of networks, so its structure is similar to the well-known four layer of NGN architecture, which includes smart sensors, transport environment, services and applications [1, 7].

The lowest level of the IoT structure consists of smart objects integrated with sensors. Sensors connect the physical and virtual (digital) worlds, providing real-time data collection and processing. Miniaturization, which reduced the physical size of hardware sensors, made it possible to integrate them directly into objects in the physical world. There are different types of sensors for the relevant purposes, for example, for measuring temperature, pressure, speed, location, etc. Sensors can have a small memory, allowing it to record a certain number of measurement results. The sensor can measure the physical parameters of the monitored object / phenomenon and convert them into a signal that can be received by the corresponding device [9].

Most sensors require a connection to a sensor aggregator (gateway), which can be implemented

using a local area network (LAN) such as Ethernet and Wi-Fi, or a personal network (PAN) such as Zig-Bee, Bluetooth, and ultra-wide-band wireless communication over short distances (UWB – Ultra-Wide Band). For sensors that do not require connection to the aggregator, their connection to servers/applications can be provided using global wireless WAN networks such as GSM, GPRS, and LTE.

The large amount of data generated at the first level of IoT by miniature sensors requires a reliable and high-performance wired or wireless network infrastructure as a transport environment (network level). To implement a wide range of services and applications in IoT, it is necessary to ensure that multiple networks of different technologies and access protocols work together in a heterogeneous configuration. These networks must provide the required values for the quality of information transmission, especially for latency, bandwidth, and security. This layer consists of a converged network infrastructure that is created by integrating heterogeneous networks into a single network platform [9].

The service level contains a set of information services designed to automate technological and business operations in the IoT: support for operational and business activities (OSS/BSS – Operation Support System/Business Support System), various analytical information processing (statistical, data and text mining, predictive analytics, etc.), data storage, information security, Business Rule Management, Business Process Management, etc.

At the fourth level of the IoT architecture, there are different types of applications for the relevant industrial sectors and fields of activity (energy, transport, trade, medicine, education, etc.). Applications can be «vertical» when they are specific to a particular industry, as well as «horizontal» (for example, fleet management, asset tracking, etc.), which can be used in various sectors of the economy [10].

Information representation in network

The idea of the Semantic Web is the direction of development of the world wide web (WWW), the purpose of which is to present information in a form suitable for machine processing. The term Semantic Web was first introduced by Tim Berners-Lee (inventor of the world wide web) in may 2001 [11]. The concept of the semantic web was adopted

and promoted by the world Wide Web Consortium (W3C). In a conventional web based on HTML pages, the information is embedded in the text of the pages and extracted by a person using a browser.

The semantic web involves recording information in the form of a semantic network using ontologies. Ontology is understood as a formal explicit description of concepts in the subject area (classes) under consideration. The ontology together with a set of individual instances of classes, forms a knowledge base. Thus, the client program can directly extract facts from the web and draw logical conclusions from them. The semantic network works in parallel with the regular network and on its basis, using the HTTP and URI identifiers [12].

Application of Internet of things technology

The modern manifestation of the Internet of things is communication between machines (M2M) via wireless communication. In Europe, this technology is already used in agriculture to track real-time movements of cattle. In addition to tracking the movement of livestock, farmers receive automatic notifications about the status of animals. M2M communication devices equipped with SIM cards are installed in the stalls and in the field, and special sensors are attached to the animals that collect information and transmit it to the data collection device. This device immediately sends the necessary information to the farmer via SMS. Animal health data can be monitored not only via SMS, but also online via the GPRS channel that links monitoring systems to the data center. In Europe, this app is already used by about 4 thousand farms [1]. For decision making various intelligent technologies can be used [12].

Proposals

The authors propose the structure of multi-agent system (MAS) of milk farms analyzing in Libyan (MASMFA) monitoring of quality of

production. Information about MAS is describe in [13]. Using proposals for organizing intelligent multi-agent information processing [14], the composition of the system's agents was determined. MASMFA structure has many agents such as sensors, communication, data base, analysis of the information received from sensor agents, decision-making. System implements the functions to ensure the required class of milk quality and allows to implement an IoT local network. To build such a IoT local network, the approaches described in article [15] will be used. Milk quality sensors will be periodically queried and their values will be recorded in the database server. The decision-making subsystem, processing the database content, will issue data on milk quality to the farm administrator on a mobile device. The server structure can be implemented using a cloud service. This network will be based on the principles of information transfer via LTE technology [16].

Conclusion

1. The analysis of management technologies in the network structures of Infocommunications, based on the NSMP, and in local networks of the Internet of things is performed. Four levels of the Internet of things local network structure are described: smart sensors, network vehicles, services, and applications.

2. The issues of identification of devices in the network, information security and practical implementation of international standards and recommendations are relevant. To logically build a network of IoT, it is necessary to develop models and algorithms for building local network management systems for agriculture implementation.

3. The structure of a multi-agent system for studying the quality of milk from farms in Lebanon is proposed. For its implementation, the Internet of things network is being built using LTE technology.

REFERENCES

1. **Roslyakov, A. V.** Internet of things: manual / A. V. Roslyakov, S. V. Vanyashin, A. Yu. Grebeshkov. – Samara: PSUTI, 2015. – 200 p.
2. Internet of things definition [Electronic resource]. – Access regime: <https://www.hpe.com/us/en/what-is/internet-of-things.html>. – Access data: 4.04.2020.
3. The Internet of Things: Today and Tomorrow [Electronic resource]. – Access regime: http://chiefit.me/wp-content/uploads/2017/03/HPE-Aruba_IoT_Research_Report.pdf. – Access data: 4.04.2020.

4. «IoT Signals» Summary of research learnings 2019 [Electronic resource]. – Access regime: <https://azure.microsoft.com/mediahandler/files/resourcefiles/iot-signals/IoT-Signals-Microsoft-072019.pdf>. – Access data: 4.04.2020.
5. The Internet of Things (IoT) explained [Electronic resource]. – Access regime: <https://www.dbbest.com/blog/the-internet-of-things/>. – Access data: 4.04.2020.
6. **Гребешков, А. Ю.** Management of telecommunication networks according to the TMN standard: manual / A. Yu. Grebeshkov. – M.: Radio and communication, 2004 – p. 155.
7. **Goldstein, B. S.** Post-NGN communication Networks / B. S. Goldstein, A. E. Curly. – SPb.: BHV–Petersburg, 2013. – 160 p.
8. Recommendation ITU–T T. 181203: An architecture for IoT interoperability. – Geneva: ITU–T 2018. – 25 p.
9. **Al-Bahri, M. S.** Modeling of the identification system of Internet of things devices based on the architecture of digital objects / M. S. Al-Bahri, R. V. Kirichek, D. D. Sazonov // Proceedings of educational institutions of communication, 2019. Vol. 5. No. 1. Pp. 42–47.
10. The Internet of Things, IoT, M2M would market [Electronic resource]. – Access regime: <http://www.tadviser.ru/a/302413>
11. **Berners-Lee, T.** The Semantic Web, T. Berners-Lee, J. Hendler, O. Lassila // Scientific American, May 2001. – P. 28–37.
12. **Vishnyakou, U. A.** Intelligent control systems: studies. manual / U. A. Vishnyakou. – Minsk, MIU, 2010. – 350 p.
13. **Leyton-Brown, K.** Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic and Logical Foundations / K. Leyton-Brown, Y. Shoham. – London: Cambridge University Press. 2009. – 513 p.
14. **Vishnyakou, U. A.** Technologies of intellectual multi-agent processing of information with blockchain for management systems / U. A. Vishnyakou, B. H. Sayya, A. H. Al-Masri, S. K. Al-Haji // Materials of scientific conf. OSTIS-2019. – Minsk: BSUIR, 2019. – P. 311–314.
15. **Rentiuk, V.** Brief guide to wireless technologies «Internet of things». Part 1. Networks, gateways, clouds, and protocols // Control Engineering Russia. 2017. № 6 (72). – P. 61–65.
16. **Rentiuk, V.** Brief guide to wireless technologies «Internet of things». Part 4. Long-range // Control Engineering Россия. 2018. № 3(75) – P. 82–87.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Росляков, А. В.** Интернет вещей: учеб. пособие / А. В. Росляков, С. В. Ванышин, А. Ю. Гребешков. – Самара: ПГУТИ, 2015. – 200 p.
2. Определение Интернета вещей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hpe.com/us/en/what-is/internet-of-things.html>. – Дата доступа: 4.04.2020.
3. Интернет вещей: сегодня и завтра [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://chiefit.me/wp-content/uploads/2017/03/HPE-Aruba_IoT_Research_Report.pdf. – Дата доступа: 4.04.2020.
4. «Сигналы ИВ» Резюме результатов научных исследований 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://azure.microsoft.com/mediahandler/files/resourcefiles/iot-signals/IoT-Signals-Microsoft-072019.pdf>. – Дата доступа: 4.04.2020.
5. Интернет вещей (ИВ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dbbest.com/blog/the-internet-of-things/>. – Дата доступа: 4.04.2020.
6. **Гребешков, А. Ю.** Управление телекоммуникационных сетях по стандарту TMN / А. Ю. Гребешков. М.: Радио и связь, 2004. – 155 с.
7. **Гольдштейн, Б. С.** Пост-NGN сети связи / Б. С. Гольдштейн, А. Е. Кучерявый. – Спб.: БХВ–Петербург, 2013. – 160 с.
8. Рекомендация ITU–T T. 181203: архитектура для обеспечения интероперабельности Интернета вещей. – Женева: МСЭ–Т 2018. 25 с.
9. **Аль-Бахри, М. С.** Моделирование системы идентификации устройств Интернета вещей на основе архитектуры цифровых объектов / М. С. Аль-Бахри, Р. В. Киричек, Д. Д. Сазонов // Известия высших учебных заведений связи. – 2019. – Т. 5. – № 1. – С. 42–47.
10. Интернет вещей, IoT, M2M мировой рынок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tadviser.ru/a/302413>. – Дата доступа: 4.04.2020.
11. **Бернерс-Ли, Т.** Семантическая Сеть / Т. Бернерс-Ли, Дж. Хендлер, О. Лассила // Scientific American. – Май, 2001. – С. 28–37.
12. **Вишняков, В. А.** Интеллектуальные системы управления: уч. пособие / В. А. Вишняков. – Minsk, МИУ, 2010. – 350 p.
13. **Лейтон-Браун, К.** Мультиагентные системы: алгоритмические, теоретико-игровые и логические основы / К. Лейтон-Браун, Ю. Шохам. – Лондон: Из-во Кембриджского Университета. – 2009. – 513 p.
14. **Вишняков, В. А.** Технологии интеллектуальной многоагентной обработки информации с блокчейн для систем управления / В. А. Вишняков, Б. Х. Сайя, А. Х. Аль-Масри, С. К. Аль-Хаджи // Сборник научных трудов ОСТИС-2019. – Минск: БГУИР, 2019. – С. 311–314.
15. **Рентиук, В.** Краткий путеводитель по беспроводным технологиям «Интернета вещей». Часть 1. Сети, шлюзы, облака и протоколы // Control Engineering Россия. 2017. № 6. – P. 61–65.
16. **Рентиук, В.** Краткий путеводитель по беспроводным технологиям «Интернета вещей». Часть 4. Дальний радиус действия // Control Engineering Россия. 2018. № 3(75). – P. 82–87.

Поступила
20.04.2020

После доработки
14.05.2020

Принята к печати
01.06.2020

ВИШНЯКОВ В.А., АЛЬ-МАСРИ А.Х., АЛЬ-ХАДЖИ С.Х.

ОРГАНИЗАЦИЯ СТРУКТУР И УПРАВЛЕНИЯ В ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЯХ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Дана символическая формула интернета вещей (IoT). Проведен анализ технологий управления как в сетевых структурах инфокоммуникаций, основанных на протоколе SNMP, так и на локальных сетях Интернета вещей. Показаны два подхода к реализации процесса управления в инфокоммуникационных сетях: один основан на создании специальных программных средств, второй – на работе с данными, описывающими сетевое устройство. Приведены основные операции SNMP. Описаны четыре уровня IoT в структуре локальной сети: интеллектуальные датчики, сетевые транспортные средства, службы и приложения. Рассмотрена структура локальной сети Интернета вещей, которая включает в себя интеллектуальные датчики, транспортную среду, сервисы и приложения для представления информации в сети использования семантик веб.

Рассмотрена структура мультиагентной системы (МАС) анализа работы молочных ферм в Ливане (МАСМ-ФА) для мониторинга качества продукции. Структура МАСМФА имеет множество агентов, таких как агенты качества молока, агенты связи, базы данных, агенты анализа информации, полученной от агентов датчиков, агенты принятия решений. Данная МАС реализует функции по обеспечению требуемого класса качества молока и основана на построении локальной сети Интернета вещей. Предложен алгоритм обработки информации в такой сети Io T. Молочные сенсоры будут периодически запрашиваться, их значения будут записываться в базу данных сервера. Подсистема принятия решений будет выдавать данные о качестве молока администратору фермы на мобильном устройстве. Серверная структура реализуется с использованием облачного сервиса. Реализации этой сети IoT разрабатывается с использованием технологии LTE.

Ключевые слова: сетевое управление, интернет вещей, умные сенсоры, транспортные сети, сервисы, приложения



Vishniakou Uladzimir. – doctor of technical science, professor of ICT department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Research interest: information management and security, electronic business, intellectual management systems.

Вишняков Владимир Анатольевич – д. т. н., профессор профессор БГУИР, каф. ИКТ. Область научных интересов: информационное управление и безопасность, электронный бизнес, интеллектуальные системы управления.

e-mail: vish2002@list.ru

Аль-Масри А. Х. – master of technical science, PhD-student of ICT department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Аль-Масри А. Х. – магистр технических наук, аспирант кафедры ИКТ БГУИР.

Аль-Хаджи С. Х. – master of technical science, PhD-student of ICT department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Аль-Хаджи С. Х. – магистр технических наук, аспирант кафедры ИКТ БГУИР.

А. М. КОВАЛЕНКО, А. А. ШЕЙНИКОВ

МОДЕЛЬ ИНЕРЦИАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

В статье рассматриваются подходы к построению комплексной инерциально-оптической навигационной системы тактического беспилотного летательного аппарата ближнего действия. Предложены алгоритмы постоянной и периодической (в промежуточных пунктах маршрута) коррекции бесплатформенной бортовой инерциальной навигационной системы. При комплексировании информации о параметрах движения беспилотного летательного аппарата (получаемой от рассматриваемых систем) была использована инвариантная слабосвязанная схема обработки данных на основе расширенного фильтра Калмана, что позволило существенно снизить систематическую составляющую погрешности бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Показаны преимущества комплексной инерциально-оптической навигационной системы при обеспечении полета беспилотного летательного аппарата в зоне действия средств радиоэлектронной борьбы противника. Представлены результаты моделирования, подтверждающие возможность обеспечения точностных характеристик инерциально-оптической навигационной системы при отсутствии сигналов спутниковых радионавигационных систем.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, бесплатформенная инерциальная навигационная система, оптико-электронная система, фильтр Калмана, комплексирование измерений датчиков

Введение

Одним из основных способов обеспечения точности позиционирования беспилотных летательных аппаратов (БЛА) является комплексирование сигналов спутниковых и инерциальных навигационных систем. Так, например, тактический БЛА ближнего действия [1], стоящие на вооружении ВС РБ, оснащены интегрированными инерциально-спутниковыми навигационными комплексами (ИСНК). Базовым элементом ИСНК является бортовая бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), которая корректируется по сигналам спутниковых радионавигационных систем (СРНС). Особенности ИСНК хорошо изучены. Такие системы обеспечивают точную навигацию БЛА при наличии устойчивого поля сигналов СРНС. Подходы к решению задач комплексной обработки информации в ИСНК достаточно полно описаны в [2].

Современные средства радиоэлектронной борьбы («Гроза-С», «Красуха») позволяют передавать специально сгенерированные сигналы, которые вносят ошибку в показания бортового приемника СРНС (т.н.

«спуффинг атаки» [3]), что приводит к неверной оценке координат носителя. В этих условиях основным источником навигационной информации БЛА остается БИНС, состоящая из МЭМС-датчиков линейных ускорений (ДУС) и датчиков угловой скорости (ДЛУ). Рассматриваемые датчики относятся к измерителям низкого класса точности [4], а их использование в составе БИНС БЛА без коррекции последней приводит к возникновению больших систематических ошибок [5].

В современных условиях развития технологий эффективным решением этой проблемы является коррекция БИНС по сигналам автономного источника пилотажно-навигационной информации бортовой оптико-электронной системы (ОЭС) [6].

Постановка задачи

Целью работы является оценка возможности комплексирования БИНС и ОЭС, разработка модели соответствующего навигационного комплекса БЛА, оценка точности предлагаемого навигационного комплекса в условиях отсутствия сигналов СРНС.

Решение задачи

Автономную навигацию предлагается организовать за счет совместной обработки сигналов с бортовой БИНС и ОЭС, соединенных в единую инерциально-оптическую навигационную систему (ИОНС). На рис. 1 показан состав и структура пилотажно-навигационного комплекса (ПНК) на основе БИНС с коррекцией от ОЭС. В качестве примера, для исследований был взят ПНК тактического БЛА ближнего действия (типа «Москит»).

В состав исследуемого ПНК входят: бортовая БИНС; модуль системы воздушных сигналов, включающий барометрический высотомер; ОЭС, состоящая из цифровой камеры и вычислителя, реализующего обработку оптической информации; система автоматического управления (САУ) (четырёхканальная, перекрестная двухконтурная с законами стабилизации и управления углами крена (γ) и тангажа (ϑ), скорости полета во внутреннем контуре, высоты (H), курса (ψ) и боковой координаты – во внешнем контуре); модуль СРНС.

Модель бортовой БИНС

Математическая модель БИНС включает в себя алгоритм угловой ориентации БЛА относительно нормальной подвижной системы координат и навигационный алгоритм определения положения центра масс БЛА в географической системе координат (СК). Ориентация осей связанной с БЛА системы координат определяется в соответствии с ГОСТ 20058–80.

Для описания ориентации БЛА в пространстве использовались углы Эйлера-Крылова [7].

Для описания ошибок БИНС была использована модель, предложенная в [8]. Эта модель представляет собой систему неоднородных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{\varphi} &= \frac{\Delta V_{Xg}}{R} - \frac{V_{Xg}}{R^2} \Delta R, \\ \Delta\dot{\lambda} &= \frac{\Delta V_{Zg}}{R \cos \varphi} + \frac{V_{Zg}}{R \cos^2 \varphi} \Delta\varphi - \frac{V_{Zg}}{R^2 \cos \varphi} \Delta R;\end{aligned}\quad (1)$$

где $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$ – погрешности счисления геоцентрической широты и долготы в скалярной форме; V_{Xg} , V_{Zg} – проекции путевой скорости БЛА; ΔV_{Xg} , ΔV_{Zg} – погрешности определения составляющих путевой скорости; R – радиус Земли;

Неоднородность вызвана погрешностями ДУС и ДЛУ, входящих в состав БИНС. Связь между сферическими и прямоугольными координатами находилась в соответствии с выражениями:

$$\begin{cases} X = R \cos \varphi \sin \lambda; \\ Y = R \sin \varphi; \\ Z = R \cos \varphi \cos \lambda; \end{cases}\quad (5)$$

Модель бортовой ОЭС

В состав ОЭС входит: монокулярная цифровая камера и вычислитель. Камера установлена в надири и жестко закреплена в фюзеляже

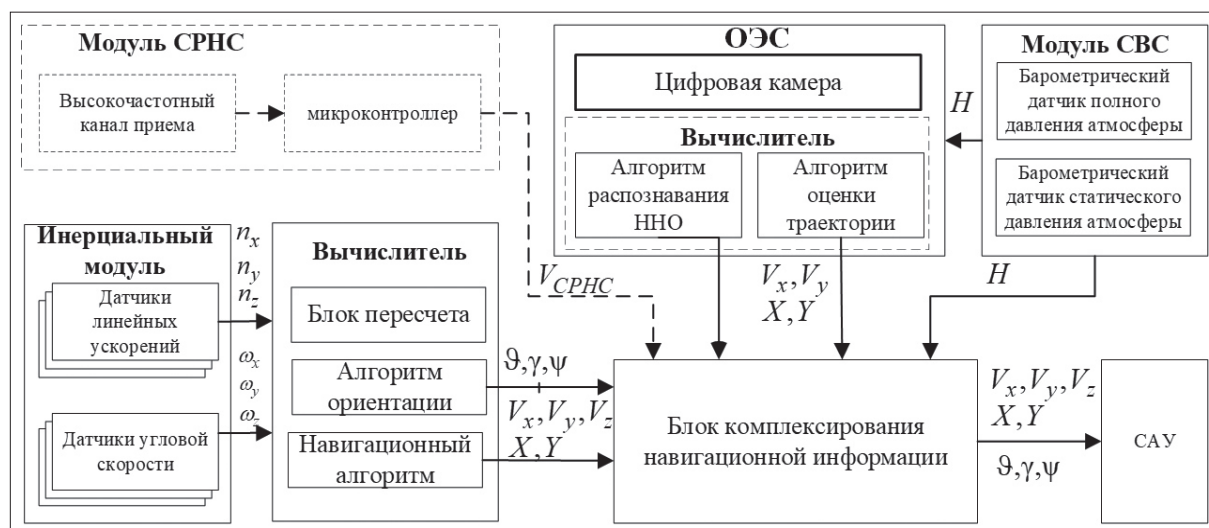


Рис. 1. Структурная схема ПНК с ОЭС

БЛА в центре масс. Она позволяет получать цифровые изображения участков местности и передавать их на бортовой вычислитель. В вычислителе заложены алгоритмы обработки последовательностей цифровых изображений (оптического потока), позволяющие оценивать составляющие координат $X^{OЭС}, Y^{OЭС}$ БЛА, а также алгоритм распознавания наземных объектов с известными координатами (наземных навигационных ориентиров (ННО)).

В качестве геометрической модели, для определения параметров взаимного расположения объектов с использованием данных ОЭС БЛА была выбрана модель монокулярной камеры с малой диафрагмой [8] (рис. 2). В этой модели участки земной поверхности проецируются на цифровую матрицу ОЭС. В процессе обработки цифрового изображения на нем выделяются контрастные участки, называемые особыми точками [9].

В соответствии со свойствами перспективной проекции в камере с малой диафрагмой координаты особых точек изображения рассчитывались следующим образом [7]:

$$X_i^{OT} = x_i^{OЭС} \frac{H}{f} + c_x, \quad Z_i^{OT} = z_i^{OЭС} \frac{H}{f} + c_z; \quad (3)$$

где $x_i^{OЭС}, z_i^{OЭС}$ – координаты особых точек на цифровом изображении; f – фокусное расстояние объектива ОЭС; H – истинная высота БЛА; c_x, c_z – координаты «главной» [10] точки изображения.

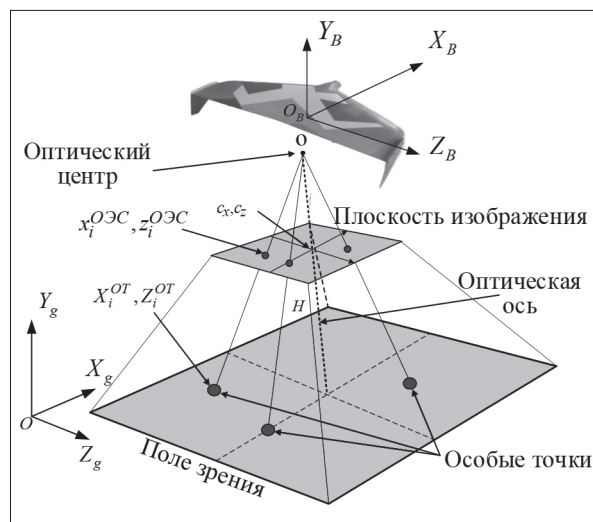


Рис. 2. Перспективная проекция в камере с малой диафрагмой

Алгоритм комплексирования информации БИНС и ОЭС

Привлечение дополнительной навигационной информации, получаемой с помощью ОЭС, реализует принцип избыточности, который обеспечивает возможность повышения точности позиционирования.

Для решения задачи комплексирования БИНС и ОЭС была использована инвариантная слабосвязанная схема обработки данных на основе расширенного фильтра Калмана (ФК) [2]. Достоинством схемы является ее сравнительная простота и независимость от характера движения носителя. При построении таких алгоритмов не требуется использование дополнительной информации об особенностях движения БЛА и его динамических свойствах, что позволяет снизить вычислительные затраты и влияние динамических ошибок [2].

В слабосвязанной схеме БИНС и ОЭС формируют оценки вектора состояния $\hat{x}_i = [\hat{x}_i^{\text{БИНС}}, \hat{x}_i^{\text{ОЭС}}]^T$. Связующий блок, включающий ФК, на основании разности показаний БИНС и ОЭС формирует оценку вектора состояния в одной системе координат и одной размерности. Оценка вектора состояния используется для коррекции БИНС и компенсации ее инструментальных погрешностей. Структура инвариантной слабосвязанной схемы обработки данных БИНС и ОЭС показана на рис. 3.

Алгоритм оценивания составляющих вектора ошибок построен на базе дискретного ФК [2,4]. При этом математическая модель ИОНС в дискретном виде описывается уравнениями состояния и измерения:

$$\begin{aligned} x(i+1) &= \Phi(i+1, i)x(i) + \Gamma(i+1, i)w(i), \\ z(i+1) &= H(i+1)x(i+1) + v(i+1); \end{aligned} \quad (4)$$

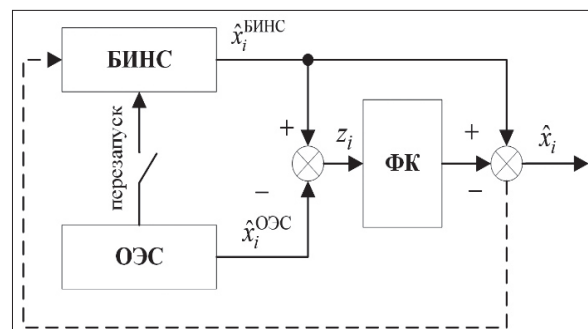


Рис. 3. Структура инвариантной слабосвязанной схемы обработки навигационной информации.

где $x(i)$ – вектор состояния системы; $z(i+1)$ вектор измерения; $v(i+1)$ вектор ошибки измерения; $w(i)$ вектор возмущения; $\Phi(i+1, i)$ блочно-диагональная переходная матрица состояния; $\Gamma(i+1, i)$ переходная матрица возмущающих воздействий; $H(i+1)$ матрица измерения.

Оценка вектора состояния системы производится на основе анализа оценок:

$$\hat{x}_i = [\hat{x}_i^{\text{БИНС}}, \hat{x}_i^{\text{ОЭС}}]^T, \quad (5)$$

$$\text{где } \hat{x}_i^{\text{БИНС}} = [X_i^{\text{БИНС}}, Z_i^{\text{БИНС}}]^T,$$

$$\hat{x}_i^{\text{ОЭС}} = [X_i^{\text{ОЭС}}, Z_i^{\text{ОЭС}}]^T;$$

где $X_i^{\text{БИНС}}, Z_i^{\text{БИНС}}$ – оценки координат БЛА по данным БИНС; $X_i^{\text{ОЭС}}, Z_i^{\text{ОЭС}}$ – оценки координат БЛА по данным ОЭС.

Вектор измерений $z(i+1)$ формируется с учетом разности данных об ошибках измерения координат БЛА, полученных от БИНС и ОЭС:

$$\begin{aligned} z_1(i+1) &= \Delta X^{\text{БИНС}}(i+1) - \Delta X^{\text{ОЭС}}(i+1), \\ z_2(i+1) &= \Delta Z^{\text{БИНС}}(i+1) - \Delta Z^{\text{ОЭС}}(i+1); \end{aligned} \quad (6)$$

Алгоритм оценивания координат БЛА, включает: выражения для вектора состояния, матрицу коэффициентов усиления, матрицу состояния, матрицу измерения, переходную матрицу, матрицу интенсивности, корреляционную матрицу.

Выражения, реализующие алгоритм дискретного оценивания вектора состояния системы, имеют вид:

$$\begin{aligned} \hat{x}(i+1, i) &= \Phi(i+1, i)\hat{x}(i, i), \\ \hat{x}(i+1, i+1) &= \hat{x}(i+1, i) + \\ &+ K(i+1)(z(i+1, i) - H(i+1)\Phi(i+1, i)\hat{x}(i, i)); \end{aligned} \quad (7)$$

Матрица коэффициентов усиления $K(i+1)$ определяется с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} K(i+1) &= \hat{P}(i+1, i)H^T(i+1)(H(i+1) \\ &\hat{P}(i+1, i)H^T(i+1) + R(i+1))^{-1}, \\ \hat{P}(i+1, i) &= \Phi(i+1, i)P(i, i)\Phi^T(i+1, i) + \\ &+ \Gamma(i+1, i)Q(i)\Gamma^T(i+1, i), \\ P(i+1, i) &= \hat{P}(i+1, i) - K(i+1)H(i+1)\hat{P}(i+1, i); \end{aligned} \quad (8)$$

где $P(i, i)$ – корреляционная матрица; $\hat{P}(i+1, i)$ – корреляционная матрица ошибки прогнозирования.

В процессе исследований использовалась модель задающего воздействия первого порядка. Т.к. систематические составляющие погрешностей оцениваются в соответствии с разностной схемой фильтрации, то для аппроксимации постоянной составляющей задающего воздействия применялись полиномы первой степени:

$$x_i = \begin{bmatrix} x_{i-1} + V_{xi}\Delta t \\ V_{xi} \end{bmatrix}; \quad (9)$$

При этом, переходная матрица состояния $\Phi(i+1, i)$ и матрица измерения $H(i+1)$, имеют вид:

$$\begin{aligned} \Phi(i+1, i) &= \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ H(i+1, i) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (10)$$

Переходная матрица возмущающих воздействий $\Gamma(i+1, i)$ и матрица интенсивности $Q(i)$ имеют вид:

$$\begin{aligned} \Gamma(i+1, i) &= \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} & 0 & 0 & 0 \\ \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta t^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t & 0 \end{bmatrix}; \\ Q(i) &= \begin{bmatrix} \sigma_{\text{ДУС}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\text{ДЛУ}}^2 \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (11)$$

где $\sigma_{\text{ДУС}}, \sigma_{\text{ДЛУ}}$ – среднеквадратические ошибки измерения ДУС и ДЛУ.

Корреляционная матрица ошибок R_i была получена по данным модели ошибок ИОНС, рассмотренной в [6, 11]:

$$\begin{aligned} R_i &= R_i^{\text{БИНС}} + R_i^{\text{ОЭС}} = \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_{X^{\text{БИНС}}}^2 + \sigma_{X^{\text{ОЭС}}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{Y^{\text{БИНС}}}^2 + \sigma_{Y^{\text{ОЭС}}}^2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (12)$$

Исследования характеристик комплексной инерциально-оптической навигационной системы

В среде виртуального моделирования MATLAB была реализована функциональная модель разработанной ИОНС на базе дискретного ФК (рис. 4).

На рис. 4 n_x, n_y, n_z – проекции линейного ускорения на оси связанной СК, вырабатываемые ДЛУ; $\omega_{xg}, \omega_{yg}, \omega_{zg}$ – проекции вектора абсолютной угловой скорости на оси географической СК, вырабатываемые ДУС; C – матрица перехода от связанной к географической СК; $V_{xg}^{OЭС}, V_{zg}^{OЭС}$ – северная и восточная составляющие линейной скорости, определяемые по данным ОЭС; $\lambda^{OЭС}, \varphi^{OЭС}$ – координаты распознанного ННО для периодической коррекции БИНС («перезапуска» БИНС с начальными значениями координат $\lambda(t_i), \varphi(t_i)$) в промежуточных пунктах маршрута.

Для упрощения модели были приняты следующие допущения:

1. Автоматическое управление полетом БЛА в горизонтальной плоскости и его стабилизация на линии заданного пути (ЛЗП) осуществляется по маршрутному методу управления;

2. Задача синхронизации данных с выхода БИНС и ОЭС решена;

3. На протяжении всего маршрута заранее выбраны ННО, данные о координатах которых используются для «перезапуска» БИНС;

4. Шаг дискретизации считается одинаковым и равным Δt ;

5. Распознавание очередного ННО происходит мгновенно с вероятностью равной 1.

Для исследования характеристик комплексной ИОНС проводилось моделирование в соответствии со следующими сценариями:

1. БЛА осуществляет полет по заданному маршруту в зоне действия средств РЭБ. Спутниковая коррекция отсутствует. Прямолинейное движение БЛА происходит с постоянной скоростью и высотой полета.

2. Движение БЛА осуществляется по квадратной траектории (барражирование «по коробочке») в зоне действия средств РЭБ (спутниковая коррекция отсутствует).

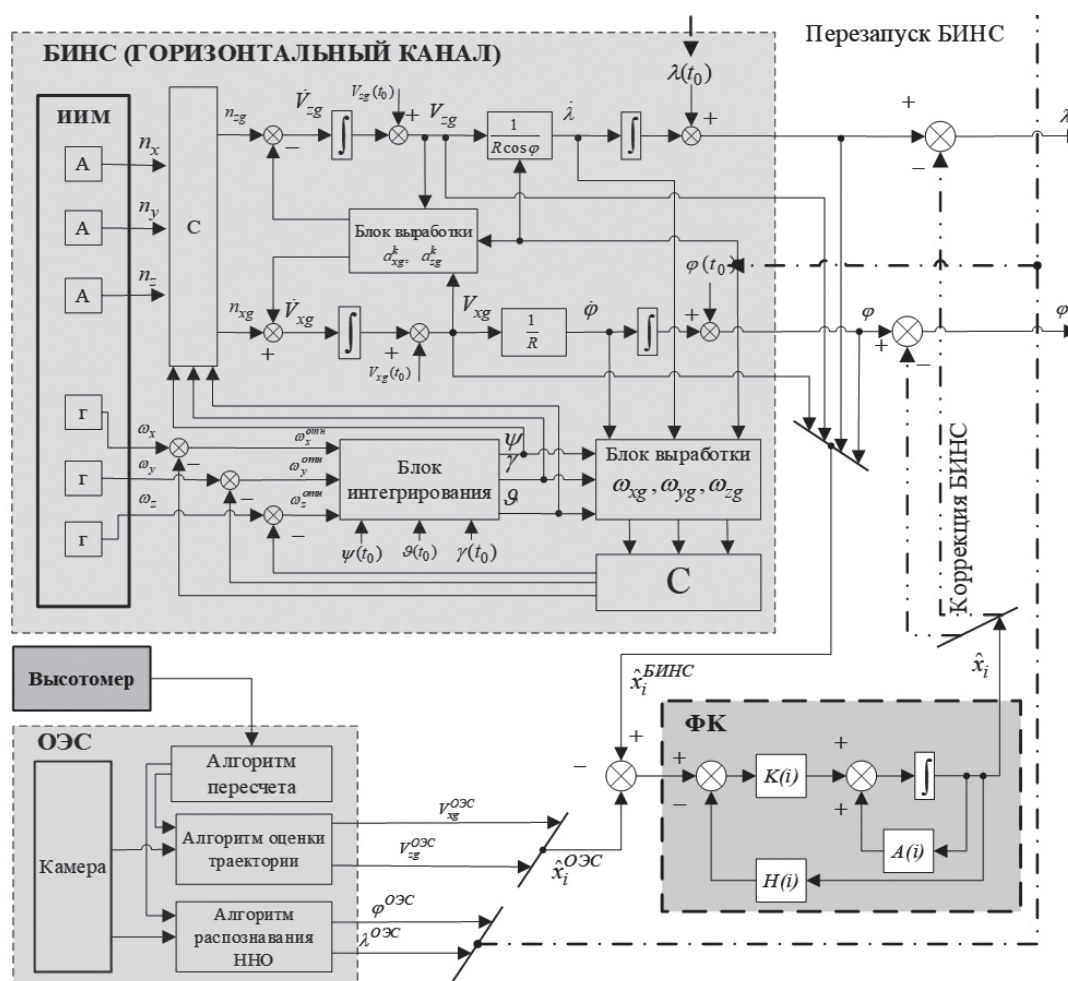


Рис. 4. Модель комплексной инерциально-оптической навигационной системы БЛА

Таблица 1. Параметры для моделирования движения БЛА

Параметры для моделирования	Значение
Систематические погрешности гироскопа, $^{\circ}/ч$	5
Систематические погрешности акселерометра, $м/с^2$	10–3
Характеристики шума гироскопа, $рад/с$	0,3
Характеристики шума акселерометра, $м/с^2$	0,029
Высота полета, м	500
Погрешность высотомера (СКО), м	20
Размер матрицы ОЭС, мм	15,6×23,5
Разрешение снимка, пикселей	6000×4000
Фокусное расстояние, мм	20

Параметры для моделирования движения БЛА представлены в таблице 1.

На рис. 5, а представлены результаты моделирования траектории БЛА по данным БИНС и по данным ОЭС ($V_x = 0 м/с$, $V_z = 15 м/с$, $H = 500 м$). Систематические составляющие погрешности МЭМС-датчиков БИНС оказывают значительное влияние на точность оценки координат БЛА. Так, например, для рассматриваемых начальных условий по истечении 100 с полета погрешность оценки координат с использованием БИНС составляет 80 м, а через 600 с – 3570 м.

Точность оценок текущих координат БЛА по оптическому потоку зависит от характеристик бортовой камеры, точности определения высоты полета, количества и расположения особых точек.

На рис. 5, б представлен вектор измерений $z(i+1)$, формируемый с учетом разности данных об ошибках измерения координат БЛА,

полученных от БИНС и ОЭС. Кроме этого, представлены результаты работы фильтра.

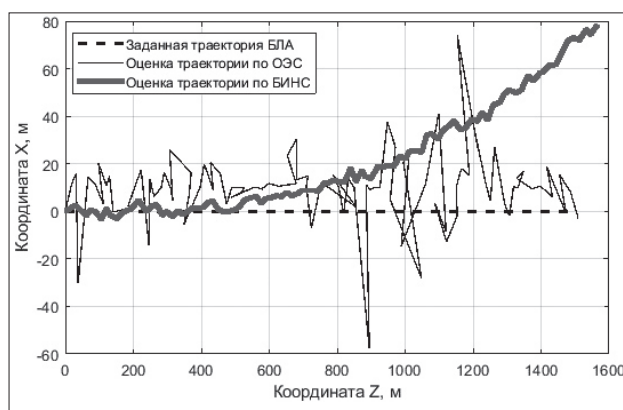
Для оценки погрешности определения координат БЛА с помощью ОЭС использовалась модель ошибок, представленная в [11].

Моделирование показало, что при прямолинейном полете БЛА с ИОНС по истечении 600 сек. (рис 6.) отклонение от заданной траектории составит не более 50 м. Такое отклонение для выбранных параметров оптической системы соответствует половине ширины цифрового кадра. При увеличении длительности полета ошибка оценки координат превышает зону, охватываемую полем зрения камеры.

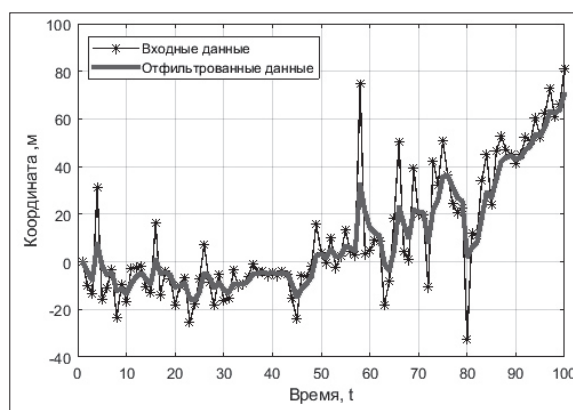
Для дальнейшего удержания БЛА на ЛЗП необходимо производить «перезапуск» БИНС в зонах с ННО (путем автоматической идентификации конкретных ННО с помощью бортовой ОЭС). Результаты работы ИОНС при полете по маршруту с «перезапуском» БИНС в зонах с ННО показаны на рис. 6, б.

На рис. 7 показаны результаты моделирования работы ИОНС в режиме барражирования БЛА по квадрату. Точка старта (рис. 7, А) расположена в начале системы координат. Точки разворотов (рис. 7, В, С, D, Е) отстоят друг от друга на 1500 м. Точка приземления (рис. 8, F) характеризует накопившуюся ошибку за время полета ИОНС по координате.

Моделирование показало, что при коррекции БИНС по данным ОЭС по истечении 1200 с полета БЛА отклонится от заданной траектории не более чем на 70 м, что является приемлемым с точки зрения обеспечения точности навигации в условиях РЭБ.



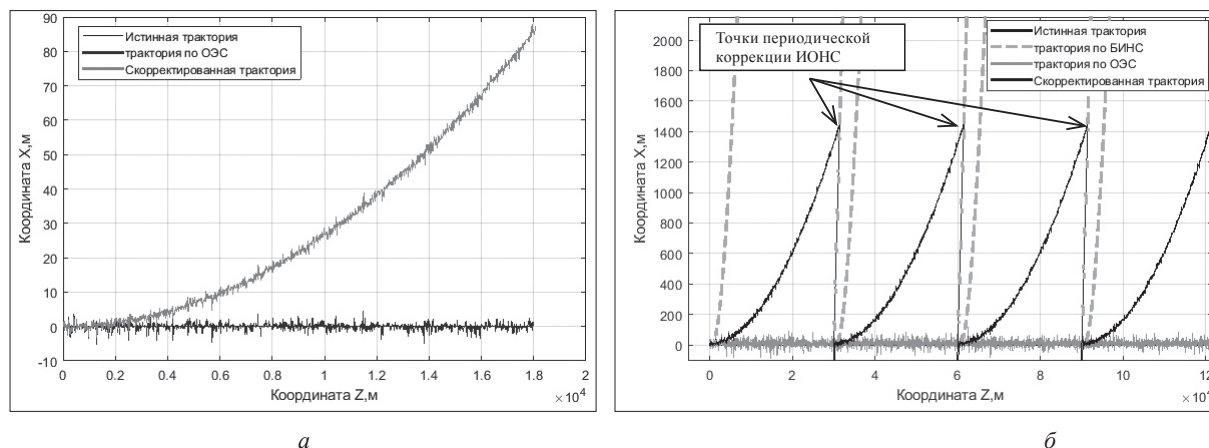
а



б

а – оценки траектории БЛА по данным БИНС и по данным ОЭС; б – выходной сигнал фильтра

Рис. 5. Результаты моделирования траектории полета БЛА



a – полет между двумя ННО; *б* – полет по маршруту с периодической коррекцией в зонах с ННО.
Рис. 6. Результаты моделирования процесса периодической коррекции БИНС с помощью ОЭС

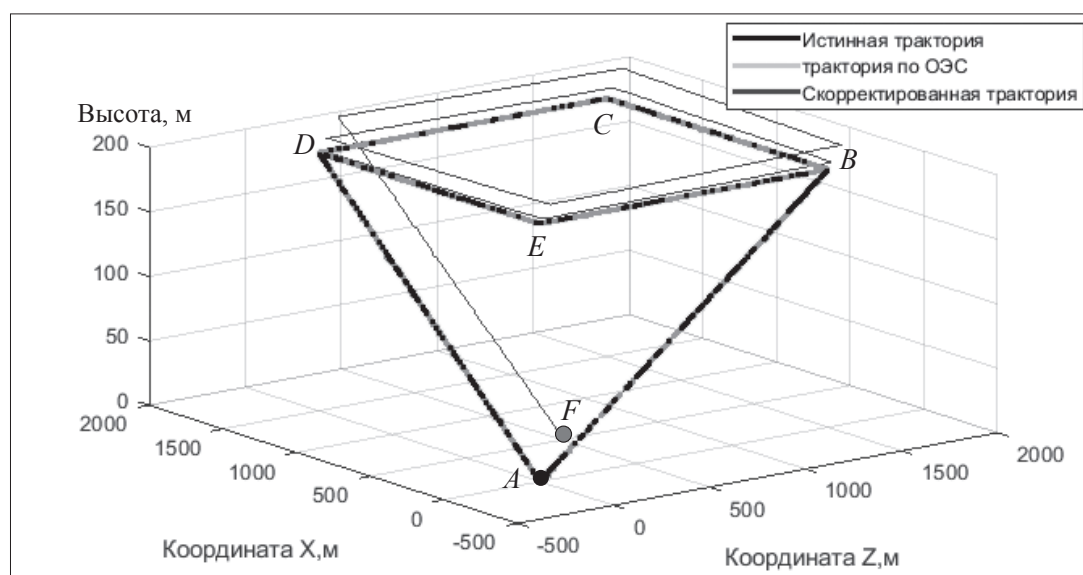


Рис. 7. Моделирование траектории барражирования БЛА по квадрату

Выводы

Таким образом, представленный алгоритм постоянной коррекции погрешностей БИНС БЛА, отличается учетом данных с бортовой ОЭС и применением методов фильтрации систематических погрешностей датчиков навигационной информации, что позволяет повысить точность оценки текущих навигационных параметров полета БЛА.

Представленный алгоритм периодической коррекции БИНС БЛА, отличается учетом пилотажных параметров носителя и применением фотограмметрических методов

оценки относительных координат, что позволяет повысить точность позиционирования БЛА в промежуточных пунктах маршрута.

Результаты моделирования показали, что точность определения координат с помощью предложенной комплексной инерциально-оптической навигационной системы существенно превышает точность определения координат штатным ПНК БЛА, что доказывает эффективность предлагаемого подхода к коррекции БИНС при полете тактического БЛА в условиях действия средств радиоэлектронной борьбы противника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азаренок, И. П. Справочник офицера Военно-воздушных сил и войск противовоздушной обороны / под ред. И. П. Азаренка (отв. Ред.) [и др.] // – Мн.: командование ВВС и войск ПВО, 2009. – с. 511

2. **Степанов, О. А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания / О. А. Степанов // СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. 509 с.
3. **Ян, Л.** Обнаружение спуфинг-атак на ГНСС с использованием ИНС/ Ян Лю, С. Ли, С. Сяо, Ц. Фу // Статья по докладу на XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2015. Том 24№ 1 (92), 2016.
4. **Матвеев, В. В.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем: учеб. пособие / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов. // СПб: ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2009.–280 с.
5. **Коваленко, А. М.** Сравнительный анализ точности инерциальной и оптической навигационных систем беспилотного летательного аппарата / А. М. Коваленко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь.– 2019.– № 4(65).– с. 110–118.
6. **Солонар, А. С.** Методика расчета ошибок разового оценивания местоположения наблюдаемых объектов в бортовых оптико-локационных объектах /А.С. Солонар и другие// доклады БГУИР.– 2018. № 2 (112). с. 26–32.
7. **Красильщиков, М. Н.** Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / М. Н. Красильщиков, Г. Г. Серебряков // М.: ФИЗМАТЛИТ. 2009.– 272 с.
8. **Hartley, R. and Zisserman, A.,** Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2003.
9. **H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool,** «Speeded-up robust features (SURF)», International Journal on Computer Vision and Image Understanding, vol. 110–346–359 pp.– 2008.
10. **Назаров, А. С.** Фотограмметрия: учеб. пособие для студентов вузов /А. С. Назаров. Мн.: ТетраСистемс, 2006.– 368 с.
11. **Коваленко, А. М.** Математическая модель ошибок инерциально-оптической навигационной системы малоразмерного БЛА / А. М. Коваленко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь.– 2020.– № 1(66).– с. 110–118.

REFERENCES

1. **Azarenok I. P.** The reference book by the officer of the Air Force and troops of air defense / under the editorship of I. P. Azarenok // [and etc.].– Minsk: command of the Air Force and troops of air defense, 2009.– page 511
2. **Stepanov, O. A.** Bases of the theory of estimation with annexes to problems of processing of navigation information. Ch.1. Introduction to the theory of estimation / O. A. Stepanov // SPb.: GNTs Russian Federation JSC «Concern Central Research Institute Elektropribor», 2010. 509 p.
3. **Yang, L.** Detection spoofing attacks on GNSS with use INS / Jan Liu, S. Li, C. Xiao, Ts. Fu // Article according to the report at the XXII St. Petersburg international conference on the integrated navigation systems, 2015. Volume 24№ 1 (92), 2016.
4. **Matveev, V. V.** Bases of creation of platformless inertial navigation systems: studies. grant / V. V. Matveev, V. Ya. Raspopov. // SPb: GNTs Russian Federation JSC Concern CSRI Elektropribor, 2009.–280 p.
5. **Kovalenko, A. M.** Comparative analysis of accuracy of inertial and optical navigation systems of the unmanned aerial vehicle / A. M. Kovalenko // Vestn. Soldier. academician of Republic Belarus.– 2019.– No. 4(65).– P. 110–118.
6. **Solonar, A. S.** Methodology for calculating of the different estimation errors of of observed objects location in the airborne optical-localational systems / Solonar and others//reports of BGUIR.– 2018. No. 2 (112). page 26–32.
7. **Krasilschikov, M. N.** Modern information technologies in problems of navigation and targeting of pilotless maneuverable aircraft / M. N. Krasilschikov //M.: FIZMATLIT. 2009.– 272 p.
8. **Hartley, R. and Zisserman, A.,** Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2003.
9. **H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool,** “Speeded-up robust features (SURF)”, In-ternational Journal on Computer Vision and Image Understanding, vol. 110–346–359 pp.– 2008.
10. **Nazarov, A. S.** Fotogrammetriya: studies. a grant for students of higher education institutions/Ampere-second. Nazarov. Mн.: ТетраСистемс, 2006.– 368 p.
11. **Kovalenko, A. M.** Mathematical model of errors of the inertial and optical navigation system of the small-sized UAV / A. M. Kovalenko//Vestn. Soldier. academician of Republic Belarus.– 2020.– No. 1(66).– p. 110–118.

Поступила
01.04.2020

После доработки
07.04.2020

Принята к печати
01.06.2020

MODEL OF THE INERTIAL AND OPTICAL NAVIGATION SYSTEM OF THE UNMANNED AERIAL VEHICLE

In article approaches to creation of the complex inertial and optical navigation system of the short-range tactical unmanned aerial vehicle are considered. Algorithms constant and periodic (in intermediate points of a route) are offered correction of the platformless onboard inertial navigation system. At integration of information on parameters of the movement of the unmanned aerial vehicle (received from the considered systems) the invariant loosely coupled scheme of data processing on the basis of the expanded filter of Kallman was used that allowed to lower significantly a systematic component of an error of the platformless inertial navigation system. Advantages of the complex inertial and optical navigation system when ensuring flight of the unmanned aerial vehicle in an area of coverage of means of radio-electronic fight of the opponent are shown. The results of modeling confirming a possibility of ensuring precision characteristics of the inertial and optical navigation system in the absence of signals of satellite radio navigational systems are presented.

Keywords: unmanned aerial vehicle, platformless inertial navigation system, optical-electronic system, Kallman's filter, integration of measurements of sensors.



Шейников Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры авиационной техники и вооружения учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Мобильный телефон для связи (персональный): +375295850027.



Коваленко Александр Михайлович – магистр технических наук, адъюнкт кафедры авиационной техники и вооружения учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

E-mail: AMKovalenko@outlook.com

Мобильный телефон для связи (персональный): +375298579793

А. А. ЛОБАТЫЙ, Ю. Ф. ЯЦЫНА, С. С. ПРОХОРОВИЧ, Е. А. ХВИТЬКО

ИДЕНТИФИКАЦИЯ УПРОЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Белорусский национальный технический университет

Решается задача определения формы и параметров математической модели в виде передаточной функции для движения беспилотного летательного аппарата (БЛА) в вертикальной плоскости пространства. В качестве входного сигнала рассматривается угол отклонения руля высоты, а в качестве выходного сигнала – угол тангажа БЛА. Используются результаты экспериментальных исследований полета БЛА, в качестве которых рассматриваются известные значения входного и выходного сигналов при заданных условиях полета. Измеренные дискретные значения результатов эксперимента для удобства их использования при идентификации аппроксимированы полиномом четвертого порядка на основе регрессионного анализа. Проведено аналитическое обоснование необходимости применения методов линеаризации математической модели движения БЛА и принятых допущений при получении дифференциальных уравнений движения БЛА относительно центра масс, позволяющих синтезировать требуемую передаточную функцию соответствующего элемента системы управления БЛА. Результаты компьютерного моделирования подтвердили обоснованность применения синтезированной математической модели, полученной на основе структурной и параметрической идентификации. Данный подход может использоваться для получения упрощенных математических моделей, которые применяются для решения задач синтеза и оптимизации систем управления не только БЛА, но и других динамических объектов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, идентификация, математическая модель, передаточная функция.

Введение

Достижения в области информационных технологий сделали математическое моделирование, пожалуй, основным направлением в развитии и применении методов анализа и синтеза сложных технических систем и их элементов, оставляя экспериментальным методам исследования лишь часть работ по подтверждению или опровержению результатов, полученных путём моделирования. Поэтому создание математических моделей технических систем и их элементов – важная задача ученых и инженеров. Вид (форма представления) математической модели и используемый для её построения математический аппарат определяется в первую очередь законами физики, на основе которых создается и функционирует данная техническая система и её тот или иной элемент.

Математическое моделирование позволяет при минимальных затратах проводить исследования технической системы в любых условиях, проводить её доработку, развитие, оптимизацию, исследовать одновременно и совместно с функционированием реальных

конструктивных элементов системы (полунатурное моделирование).

После определения общего вида математической модели системы стоит задача приведения её параметров (постоянных и переменных) в соответствие реальной системе (объекту исследований), чтобы при проведении моделирования у модели проявлялись те же свойства, которые интересуют разработчиков и исследователей реальной системы. Это является задачей идентификации.

Под идентификацией в широком смысле понимается получение или уточнение по экспериментальным данным модели реального объекта (процесса), выраженной в тех или иных терминах (описанной на том или ином языке). Идентификацией динамической системы (процесса) называется получение или уточнение по экспериментальным данным математической модели этой системы или процесса, выраженной посредством того или иного математического аппарата [1]. Существует большое разнообразие методов идентификации систем. Выбор того или иного метода идентификации определяется априорной

информацией об объекте, способом представления характеристик объекта и методом проведения эксперимента на объекте [2, 3, 4].

Среди объектов идентификации широкое распространение получили интенсивно развивающиеся в настоящее время беспилотные летательные аппараты (БЛА). Достижения в области микроэлектроники механики, оптики дали БЛА такие свойства и возможности, которые позволили БЛА при решении ими ряда задач выполнять функции, которые прежде были присущи только пилотируемым летательным аппаратам. В первую очередь это относится к задачам мониторинга земной поверхности в различных диапазонах волн (оптическом, инфракрасном, радиотехническом) благодаря способности БЛА иметь на своем борту полезную нагрузку в виде миниатюрной аппаратуры, решающей различные задачи обработки информации и управления. При этом к аэродинамическим свойствам БЛА как правило не предъявляются высокие требования по обеспечению маневренности, как например, к боевым или пассажирским пилотируемым летательным аппаратам в силу того, что БЛА предназначены в первую очередь для выполнения узкого круга конкретных задач, полет их обычно производится по простому заданному маршруту. К тому же стоимость БЛА должна быть небольшой, чтобы в случае его аварии материальный ущерб был минимальным.

Следовательно, исходя из этого, конструктивная и аэродинамическая компоновка БЛА выбирается как можно более простой. У БЛА отсутствуют присущие пилотируемым летательным аппаратам дополнительные сложные аэродинамические поверхности такие, как закрылки, предкрылки и т.п. Аэродинамическая компоновка БЛА как правило ограничивается наличием управляемого стабилизатора (руля высоты), элеронами, иногда – рулем направления, которые обеспечивают взлет, полет по заданной траектории и успешное приземление в заданной точке. Изготовление конструкции БЛА, выполняющего такие задачи, не представляет особых трудностей с учетом того, что синтез системы управления полетом и полезной нагрузкой – отдельная задача.

Синтез подробной математической модели летательного аппарата с учетом его

аэродинамических свойств представляет собой сложную задачу, требующую как математического описания каждого элемента конструкции, так и описания взаимного влияния различных элементов объекта. Для решения этой задачи необходимо производить исследования с помощью специальных аэродинамических труб и (или) с помощью сложных дорогостоящих компьютерных программ, не всегда позволяющих получить адекватные результаты. В то же время для синтеза системы управления БЛА, обеспечивающей успешный полет и управление полезной нагрузкой (системой мониторинга) достаточно иметь упрощенную приближенную математическую модель планера БЛА, осуществляющего поступательное и вращательное движение в пространстве.

Анализ результатов экспериментального исследования

Путем полунатурного эксперимента было проведено исследование поведения БЛА конкретной аэродинамической и конструктивной компоновки при его полете по заданной траектории в вертикальной плоскости. При этом использовалась подробная математическая модель движения БЛА в пространстве, реализованная с помощью программного пакета Matlab-Simulink, описанная в [5]. На рис. 1 представлены: график изменения во времени угла отклонения руля высоты $\delta(t)$ (нижний график) и график изменения во времени реакции БЛА на $\delta(t)$ в виде изменения угла тангажа БЛА $\vartheta(t)$ (верхний график). С учетом того, что привод руля в данном случае обладает высоким быстродействием, график $\delta(t)$ по виду близок к прямоугольному импульсу. Задача состоит в определении приближенной математической модели БЛА при заданных входном $\delta(t)$ и выходном $\vartheta(t)$ сигналах, представленной в виде передаточной функции $W(p) = \frac{\vartheta(p)}{\delta(p)}$.

В данной задаче мы имеем объект идентификации, для которого известны описывающие его динамику операторные (дифференциальные) уравнения во временной области, а на вход объекта поступает специальный пробный сигнал в виде прямоугольного импульса заданной амплитуды.

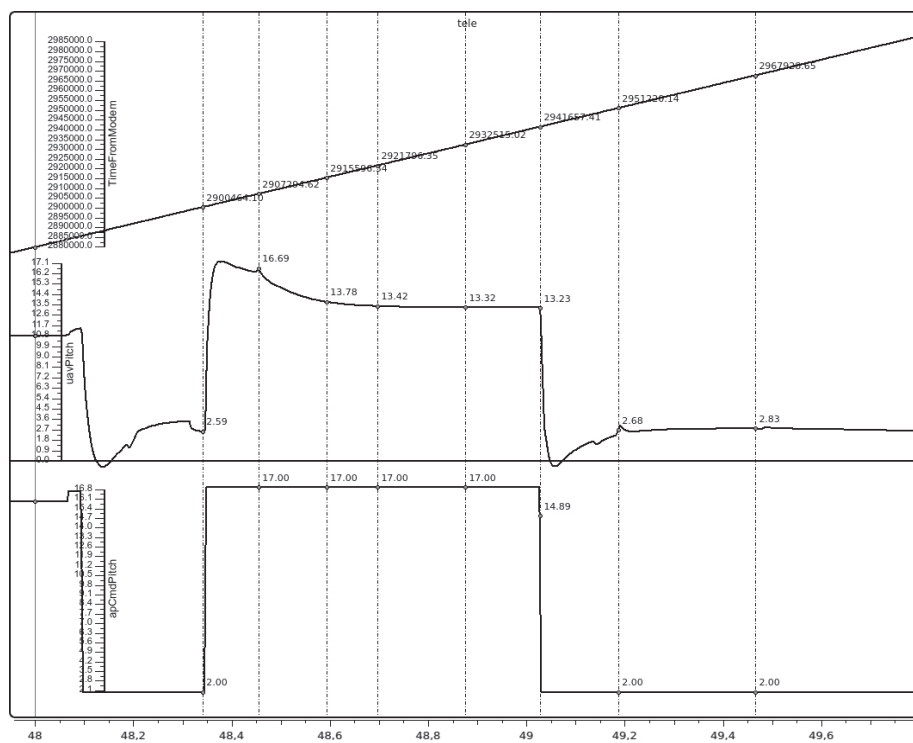


Рис. 1. Результаты экспериментальных исследований

В данном эксперименте точные значения сигналов получены в дискретные моменты времени, которые на графике выделены вертикальными прямыми. Дискретные значения векторов k -х моментов времени t_k и угла тангажа ϑ_k имеют вид:

$$t_k = [0, 0.683, 1.513, 2.133, 3.205, 4.120]^T, \\ \vartheta_k = [0, 16.69, 13.78, 13.42, 13.32, 13.23]^T.$$

Определим связь между зависимой переменной $\vartheta(t)$ и независимой переменной $t(t)$ на основе известных значений ϑ_k и t_k . Для этого используем метод регрессионного анализа [6] и проведем аппроксимацию значений $\vartheta_k(t_k)$ полиномом вида

$$A(t) = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_nx^n + \varepsilon, \quad (1)$$

где $b_0, b_1, \dots, b_n$ – неизвестные параметры, ε – случайная ошибка аппроксимации с нулевым математическим ожиданием и постоянной дисперсией.

Чтобы не выполнять громоздкие аналитические вычисления воспользуемся стандартными встроенными функциями системы компьютерной математики Mathcad [...]. $A(t) := \text{interp}(s, x, y, t)$, где $s := \text{regress}(x, y, k)$ – встроенная функция для построения полиномиальной

регрессии, x – вектор действительных данных аргумента, y – вектор действительных данных значений функции того же размера, t – значение аргумента полинома регрессии, при котором вычисляется интерполирующая функция k – степень интерполирующего полинома. Значения $\vartheta(0)$ из вектора аппроксимации исключаем, так как в соответствии с результатами эксперимента (рис. 1) при $t=0$ $\vartheta=0$.

На рис. 2 представлены результаты аппроксимации точек $\vartheta_k(t_k)$. При этом наиболее приемлемый результат аппроксимации получен при степени полинома $k=4$.

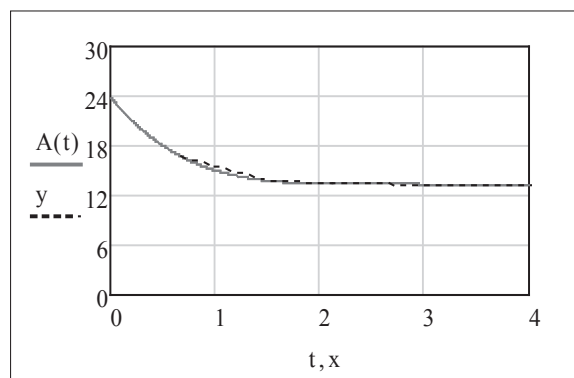


Рис. 2. Результаты аппроксимации точек

Аналитический синтез модели движения БЛА

Для получения аналитической зависимости угла тангажа БЛА ϑ , как и любого летательного аппарата самолетной аэродинамической схемы, от угла отклонения руля δ необходимо рассматривать математическую модель движения БЛА, включающую уравнения движения центра масс БЛА как твердого тела и уравнения движения БЛА вокруг центра масс. Уравнения движения любого БЛА представляют собой сложные функциональные зависимости параметров движения БЛА от большого числа аэродинамических коэффициентов, представляющих собой частные производные соответствующих переменных. Для решения большинства задач управления, оптимизации БЛА, построения тренажеров используются различные способы аппроксимации аэродинамических коэффициентов [8, 9].

Для получения передаточных функций, описывающих взаимозависимости между различными переменными, характеризующими движение БЛА в пространстве, необходимо рассматривать линеаризованные дифференциальные уравнения движения БЛА. При этом как правило рассматривается так называемая модель короткопериодического продольного движения БЛА «в малом», получаемая из «полной» модели путем пренебрежения влиянием приращения скорости БЛА на приращение нормальной перегрузки и приращение продольного момента, что при постоянной скорости БЛА является вполне допустимым.

В работе [8] и других источниках, ссылающихся на [8], приводятся передаточные функции для короткопериодического продольного движения БЛА, которые рассматриваются для горизонтального прямолинейного невозмущенного программного движения БЛА при условии пренебрежения подъемной силой поворотного стабилизатора (руля высоты). Передаточную функцию зависимости угла ϑ от угла отклонения руля δ в ряде работ представляют в форме последовательного соединения усилительного, колебательного, форсирующего звена первого порядка и интегрирующего звеньев в следующем виде

$$W(p) = \frac{g(p)}{\delta(p)} = \frac{b_0 + b_1 p}{(a_0 + a_1 p + a_2 p^2)p} = \frac{K_\delta^g (T_1 p + 1)}{(T_2^2 p^2 + 2T_2 \zeta p + 1)p}, \quad (2)$$

где K_δ^g – обобщенный коэффициент усиления, T_1 , T_2 – постоянные времени, ζ – коэффициент (декремент) затухания, p – оператор преобразования Лапласа.

Для получения передаточной функции вала (2) рассматривается линеаризованная математическая модель движения БЛА в вертикальной плоскости, которая имеет вид [10]:

$$\ddot{y} = \frac{P + Y^\alpha}{m} \alpha + \frac{P - X_a}{m} \dot{y} + \frac{Y^\delta}{m} \delta - g, \quad (3)$$

$$\ddot{\vartheta} = \left(\frac{m_z^\omega + m_z^\alpha}{I_z} \right) \omega_z + \left[\frac{m_z^\alpha}{I_z} - \frac{m_z^\alpha (P + Y^\alpha)}{I_z m V} \right] \alpha + \left(\frac{m_z^\delta}{I_z} - \frac{m_z^\alpha Y^\delta}{I_z m V} \right) \delta + \frac{m_z^\alpha}{I_z V} g, \quad (4)$$

$$\dot{\alpha} = \omega_z - \frac{P - Y^\alpha}{m V} \alpha + \frac{g}{V} - \frac{Y^\delta}{m V} \delta. \quad (5)$$

В выражениях (3)-(5): m – масса, V – скорость, I_z – момент инерции БЛА, P – сила тяги, Y^α и Y^δ – проекции составляющих аэродинамической силы, вызванные соответствующими углами α и δ , m_z^α , m_z^ω , m_z^δ – аэродинамические коэффициенты. При обосновании выражений (3)-(5) в [10] принято, что $\alpha = \vartheta - \theta$, $\dot{\alpha} = \dot{\vartheta} - \dot{\theta}$, $\dot{\vartheta} = \omega_z$, $\dot{y} \approx V\theta$, а с учетом малости углов – $\sin \alpha = \alpha$, $\sin \vartheta = \vartheta$, $\cos \alpha = \cos \vartheta = 1$, $\dot{\vartheta} = \omega_z$.

Продифференцируем выражение (4) и подставим в него выражение (5), при этом учтем, что $\dot{g} = 0$ и $\frac{P - Y^\alpha}{m V} \alpha + \frac{g}{V} \approx 0$, так как эти составляющие угловой скорости направлены в разные стороны и приблизительно равны. В результате преобразований получим выражение:

$$a_2 \ddot{\vartheta} + a_1 \dot{\vartheta} + a_0 \vartheta = b_0 \delta + b_1 \dot{\delta}, \quad g(0) = g_0, \dot{g}(0) = \dot{g}_0, \ddot{g}(0) = \ddot{g}_0, \delta(0) = \delta_0. \quad (6)$$

В выражении (6) обозначено:

$$a_0 = -\frac{m_z^\alpha}{I_z} + \frac{m_z^\alpha (P + Y^\alpha)}{I_z m V},$$

$$a_1 = \frac{-m_z^\omega - m_z^\alpha}{I_z}, \quad a_2 = 1,$$

$$b_0 = -\frac{Y^\delta}{mV} \left[\frac{m_z^\alpha}{I_z} - \frac{m_z^\alpha (P + Y^\alpha)}{I_z mV} \right],$$

$$b_1 = \frac{m_z^\delta}{I_z} - \frac{m_z^\alpha Y^\delta}{I_z mV}.$$

Преобразовав выражение (6) по Лапласу при нулевых начальных условиях, получим

$$p(a_2 p^2 + a_1 p + a_0) \vartheta = (b_0 + b_1 p) \delta. \quad (7)$$

Из выражения (6) получается выражение для передаточной функции вида (1).

Следует заметить, попытки использовать выражения (1) или (7) для компьютерного моделирования движения БЛА связаны с определенными трудностями, обусловленными программной реализацией дифференцирующего звена. В цифровой информационной системе (компьютере, ЭВМ), классического типа (выполненной по схеме Джона фон Неймана), такого рода операции выполняются приближенными методами, вносящими существенные искажения в ожидаемый результат. Кроме того наличие в составе $W(p)$ интегрирующего звена приводит к искажению динамически изменяющегося выходного сигнала системы.

В то же время при рассмотрении горизонтального полета БЛА с нулевым углом наклона траектории ($\theta = 0$) и с постоянной скоростью, что характерно для БЛА, существенно упрощается постановка задачи ($\alpha = \vartheta$, $\dot{\alpha} = \dot{\vartheta}$) и выражение (4) принимает следующий вид [10]:

$$\ddot{\vartheta} = \frac{m_z^\omega + m_z^\alpha}{I_z} \dot{\vartheta} + \frac{m_z^\alpha}{I_z} \vartheta + \frac{m_z^\delta}{I_z} \delta. \quad (8)$$

Операторное уравнение в данном случае будет иметь вид

$$(a_2 p^2 + a_1 p + a_0) \vartheta = b_0 \delta, \quad (9)$$

а передаточная функция БЛА имеет вид колебательного звена

$$W(p) = \frac{\vartheta(p)}{\delta(p)} = \frac{b_0}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2} =$$

$$= \frac{K_\delta^\vartheta}{T^2 p^2 + 2T\zeta p + 1}. \quad (10)$$

Таким образом, задача идентификации математической модели БЛА сводится к подбору коэффициентов колебательного звена T и ζ ,

так как обобщенный коэффициент K_δ^ϑ вычисляется как отношение выходного сигнала ко входному в установившемся режиме (при $p=0$). Коэффициент затухания ζ выбирается исходя из требований к переходной характеристике системы (величине перерегулирования, времени переходного процесса). В инженерной практике, как правило, оптимальным считают $\zeta=0.7$. Условием определения значения T будем считать равенство величин выходного сигнала ϑ , полученных экспериментальным путем и полученным аналитически после окончания переходного процесса. Пусть в момент времени $t=3$ с разность между экспериментальным и теоретическим значениями ϑ не должна превышать 0.001. Путем компьютерного моделирования (перебором значений T) установлено, что при $T=0.22438$ разность между экспериментальным и теоретическим значениями ϑ составляет 0.000924.

На рис. 3 представлены графики изменения $\delta(t) = u_k$ и $\vartheta(t) = z_k$, полученные в среде Mathcad, при использовании модели движения БЛА в виде (10). Сравнивая графики $\delta(t)$ и $\vartheta(t)$, представленные на рис. 1 и рис. 3 видно, что эти графики по своей форме схожи между собой. Отличия между ними обусловлены принятыми многочисленными допущениями (линеаризация, малость углов и т.д.) при получении аналитических выражений.

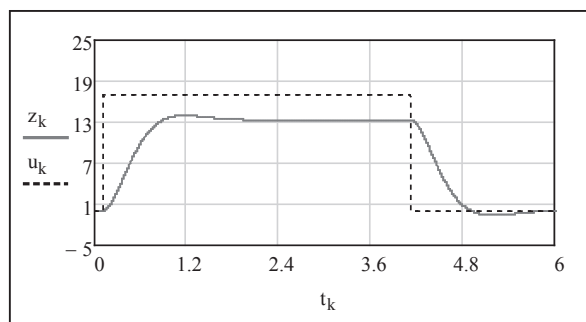


Рис. 3. Результаты математического моделирования

Заключение

На основе результатов экспериментального полунатурного исследования полета БЛА решается задача структурной и параметрической идентификации математической модели вращательного движения БЛА в вертикальной плоскости пространства. При этом аналитически получена передаточная функция рассматриваемой системы управления полетом БЛА

на основе известной математической модели движения БЛА. Аппроксимация полученных дискретных результатов экспериментальных исследований полиномом четвертого порядка позволила получить непрерывную функцию изменения выходного параметра, используемого для идентификации искомой передаточной функции. Обоснованы соответствующие допущения, принятые при решении задачи, в качестве которых рассматривались линеаризация, заданный диапазон условий применения БЛА, пренебрежение некоторыми факторами, оказывающими незначительное влияние на конечный результат.

Результаты компьютерного моделирования подтвердили обоснованность применения синтезированной математической модели БЛА, полученной на основе структурной и параметрической идентификации, для решения задач, не требующих подробного исследования аэродинамических свойств БЛА. Данный подход может использоваться для получения упрощенных математических моделей, которые применяются для решения задач синтеза и оптимизации систем управления не только БЛА, но и других динамических объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-ти тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т. 2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 638 с.
3. **Лобатый, А. А.** Параметрическая идентификация стохастической системы неградиентным случайным поиском / А. А. Лобатый, В. Ю. Степанов // Наука и техника, 2017. № 3. С. 256–261.
4. **Лобатый, А. А.** Поисковый алгоритм параметрической идентификации электропривода системы мониторинга / А. А. Лобатый, А. С. Абуфанас, А. А. Шведко // Системный анализ и прикладная информатика, 2017. № 2(14). С. 39–45.
5. **Яцына, Ю. Ф.** Компьютерное моделирование контура управления беспилотного авиационного комплекса для обеспечения устойчивости и управляемости / Ю. Ф. Яцына, Ю. В. Гриднев // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, 2018. Т. 63, № 3. С. 368–380.
6. **Таха, Х. А.** Введение в исследование операций / Х. А. Таха. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 912 с.
7. **Кирьянов, Д. В.** Mathcad 15/ Mathcad Prime 1.0. / Д. В. Кирьянов – СПб. БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.
8. **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.
9. **Моисеев, В. С.** Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами / В. С. Моисеев. – Казань: ГБУ РЦМКО, 2013. – 768 с.
10. **Дмитриевский, А. А.** Внешняя баллистика / А. А. Дмитриевский, Л. Н. Лысенко. – М.: Машиностроение, 2005. – 608 с.

REFERENCES

1. **Krasovskij A. A.** Handbook of the theory of automatic control / ed. A. A. Krasovskogo. – M.: Nauka, 1987. – 712 p.
2. Methods of classical and modern theory of automatic control: a Textbook in 5 TT.; 2nd ed., reprint. and additional Volume 2: Statistical dynamics and identification of automatic control systems / Under the editorship of K. A. pupkov and N. D. Egupov. – M.: Publishing house of Bauman Moscow state technical University, 2004. – 638 p.
3. **Lobaty, A. A.** Parametric identification of stochastic system with random search nigredients / A. A. Lobaty, V. Y. Stepanov // Science and technology, 2017. No. 3. P. 256–261.
4. **Lobaty, A. A.** The Search algorithm of parametric identification of the actuator monitoring system / A. A. Lobaty, A. S. Ibufenac, A. A., Shvedko // System analysis and applied Informatics, 2017. No. 2(14). P. 39–45.
5. **Yatsyna, Y. F.** Computer modeling of the control contour of an unmanned aviation complex for ensuring stability and controllability / Y. F. Yatsyna, Yu. V. Gridnev // Vesti natsyanyalnai Akademii navuk Belarusi, 2018. Vol. 63, No. 3. Pp. 368–380.
6. **Taha, H. A.** Introduction to operations research / H. A. Taha. – Moscow: publishing house “Williams”, 2005. – 912 p.
7. **Kiryanov, D. V.** Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0. / D. V. Kiryanov-Saint Petersburg, 2012. – 432 p.
8. **Krasovskiy, A. A.** Automatic control Systems of aircraft / A. A. Krasovskiy, A. A., Yu. a. Vavilov, A. I. Suchkov. – Moscow: vvii im. n. E. Zhukovsky, 1986. – 477 p.
9. **Moiseev, V. S.** Applied theory of control of unmanned aerial vehicles / V. S. Moiseev. – Kazan: GBU RCMKO, 2013. – 768 p.
10. **Dmitrievsky, A. A.** External Ballistics. Dmitrievsky, L. N. Lysenko. – M.: Mechanical Engineering, 2005. – 608 p.

Поступила
12.04.2020

После доработки
12.05.2020

Принята к печати
01.06.2020

LOBATY A.A., YATSYNA Y.F. PROHOROVITH S.S., HVITKO E. A.

IDENTIFICATION OF A SIMPLIFIED MATHEMATICAL MODEL OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

Belarusian National Technical University

The problem of determining the shape and parameters of a mathematical model in the form of a transfer function for the movement of an unmanned aerial vehicle (UAV) in the vertical plane of space is solved. The angle of deviation of the Elevator is considered as the input signal, and the pitch angle of the UAV is considered as the output signal. We use the results of experimental studies of UAV flight, which are considered as known values of input and output signals under specified flight conditions. The measured discrete values of the experimental results are approximated by a fourth-order polynomial based on regression analysis for ease of use in identification. The analytical substantiation of the need to apply the methods of linearization of the mathematical model of UAV movement and the accepted assumptions for obtaining differential equations of UAV movement relative to the center of mass, allowing to synthesize the required transfer function of the corresponding element of the UAV control system. The results of computer modeling confirmed the validity of the synthesized mathematical model obtained on the basis of structural and parametric identification. This approach can be used to obtain simplified mathematical models that are used to solve problems of synthesis and optimization of control systems not only for UAVS, but also for other dynamic objects.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, identification, mathematical model, transfer function.*



Лобатый Александр Александрович, доктор технических наук, профессор. Возглавляет кафедру «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета. Проводит исследования в области анализа и синтеза систем управления, в том числе – беспилотными летательными аппаратами.

Lobaty A.A., doctor of Science, Professor. From 2000 he heads of the department «Information Systems and Technologies» at the Belarusian National Technical University. Conducts research in the areas of analysis and synthesis of control systems including unmanned aerial vehicles

Тел: +375 (29) 346–82–56. E-mail: lobaty@bntu.by



Яцына Юрий Францевич, директор Научно-производственного центра многофункциональных беспилотных комплексов Национальной академии наук Беларуси. Специалист в области разработки систем управления мобильных роботизированных систем.

Тел: +375 (29) 758–43–04. E-mail: yanvad003@gmail.com

Yatsyna Y.F., director of the State Research and Production Enterprise unmanned multipurpose complexes. A specialist in the field of research and development of control systems of mobile robotic systems for various economic purposes.



Прохорович Сергей Сергеевич, аспирант кафедры «Робототехнические системы» Белорусского национального технического университета. Проводит исследования в области анализа и синтеза стохастических систем управления применительно к беспилотным летательным аппаратам.

Prohorovith S.S., 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: Sergeyprohorovich@gmail.com



Хвитько Евгений Анатольевич, 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. E-mail: evgeni.hvitko@bntu.by

Hvitko 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.

**ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**

**DATA PROCESSING
AND DECISION-MAKING**

Ю. И. ГОЛУБ¹, Ф. В. СТАРОВОЙТОВ², В. В. СТАРОВОЙТОВ¹

ВЛИЯНИЕ УМЕНЬШЕНИЯ РАЗМЕРОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ВЫЧИСЛЕНИЕ ОЦЕНКИ ЕГО КАЧЕСТВА

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

² Белорусский национальный технический университет

В статье описаны исследования влияния уменьшения изображений на количественную оценку их качества. Под уменьшением изображения подразумевается пропорциональное уменьшение горизонтального и вертикального разрешений изображения в пикселях. В рамках данных исследований был выполнен анализ корреляции между количественными оценками качества изображений и субъективными оценками экспертов. Для экспериментов использовались изображения из общедоступной базы TID2013с разрешением изображений 512×384 пикселя и с экспертными оценками их качества, а также фотографии, сделанные цифровой фотокамерой Nikon D5000 с разрешением 4288×2848 пикселя. Все изображения уменьшались в 2, 4 и 8 раз. Для уменьшения использовались два метода: билинейная интерполяция и интерполяция по ближайшему соседу.

Для оценки качества изображений было отобрано 22 меры. Количественная оценка качества изображения вычислялась в два этапа. На первом этапе получали массив локальных оценок в окрестности каждого пикселя с использованием отобранных мер. На втором этапе вычислялась глобальная оценка качества по полученным локальным. Для обобщения локальных оценок качества рассматривались параметры 16 распределений случайных величин.

По результатам экспериментов сделан вывод, что точность оценки качества для некоторых мер снижается при уменьшении изображений (например, меры FISH, GORD, HELM, LOEN). Рекомендуется применять меры BREN и SHAR. Для уменьшения изображений лучше использовать метод интерполяции ближайшего соседа. При этом время вычислений оценок в среднем сокращается в 4 раза при уменьшении изображений в 2 раза. При уменьшении изображений в 8 раз, время вычислений в среднем снижается в 80 раз. При этом объем памяти необходимой для хранения цифровых изображений уменьшается в 25 раз.

Ключевые слова: цифровое изображение, оценка качества изображения, уменьшение изображения, разрешение изображения, корреляция Спирмена, распределение случайных величин

Введение

В настоящее время увеличивается количество цифровых устройств, при помощи которых можно получать цифровые изображения. Объемы регистрируемых и хранимых изображений растет с каждым годом. Размеры космических снимков могут составлять миллиарды пикселей. Например, радарные изображения достигают разрешения 23000×43000 пк и глубины 64 бит на пиксель. С увеличением потока информации растет и потребность в анализе качества регистрируемых видеоданных. Изображения плохого качества могут снижать точность различных алгоритмов, например, при распознавании личности, обработке медицинских и спутниковых снимков.

Целью данной работы было исследование влияния уменьшения цифровых изображений на изменение безэталонных оценок их качества. Сделана попытка определить допустимый

размер уменьшения изображения без существенного изменения оценки качества.

В соответствии с целью работы были поставлены следующие задачи: выбрать меры качества, которые необходимо исследовать; проанализировать изменения гистограмм распределения локальных оценок качества при уменьшении размера изображения; проанализировать зависимость между визуальными и количественными оценками качества изображений при их уменьшении; выбрать лучший способ уменьшения изображений; выбрать размер, до которого можно уменьшить изображение без потери точности оценки качества.

До настоящего времени подобные исследования не проводились.

Исходные данные для экспериментов

В качестве инструментального средства использовался пакет прикладных программ MATLAB.

Экспериментальными данными служили реальные изображения:

1. изображения с искусственно созданными искажениями из общедоступной базы TID2013 [1]. Отобраны три типа искажений: добавление к исходному изображению аддитивного гауссовского шума, глобальное размытие при помощи фильтра Гаусса, а также изменение контраста (рис. 1). В базе по 120 изображений каждого вида с разной степенью искажений, 5 искусственно созданных изображений отбраковано из-за внесения лишних выбросов в результаты экспериментов. Данная база была использована из-за разделения изображений по видам искажений, а также из-за наличия визуальных оценок экспертов для всех изображений в базе, что дает возможность сравнивать их с получаемыми количественными оценками;

2. изображения с естественными искажениями, полученные при помощи цифрового фотоаппарата Nikon D5000 (БД Рябина). Формат матрицы фотоаппарата – 1/2.3, разрешение – 12 мегапикселей (максимальное разрешение снимка – 4288×2848 пикселей). Полученные при естественном освещении фотоснимки сохранялись без применения внутрикамерной обработки и алгоритмов сжатия, т.е. изображения сохранены в формате RAW. После чего при помощи программы FastStone

Image Viewer [2] фотоснимки были конвертированы в формат JPG (рис. 2).

Результаты экспериментов

Для изменения размеров изображений использованы два метода интерполяции, которые реализованы в системе MATLAB: nearest – используется значение ближайшего пикселя; bilinear – используется интерполяция по билинейной поверхности [3]. В MATLAB, если размеры выходного изображения меньше чем размеры входного, и при этом используется интерполяция по билинейной поверхности, исходное изображение предварительно фильтруется фильтром нижних частот (ФНЧ) с целью устранения эффекта ступенчатости. По умолчанию используется усредняющий фильтр с размером маски 11×11 (этот размер использован в экспериментах). На рис. 3 представлен результат уменьшения изображений из базы TID2013 двумя описанными выше методами. На рис. 4 – результат уменьшения изображений из базы Рябина.

Анализируя визуально рисунки 3–4, можно заметить, что уменьшение изображений при использовании интерполяции по ближайшему соседу дает более четкие края. Шум на изображениях также становится более выраженным (рис. 3, в, первый ряд) отчего картинка кажется еще более зашумленными. Изображения

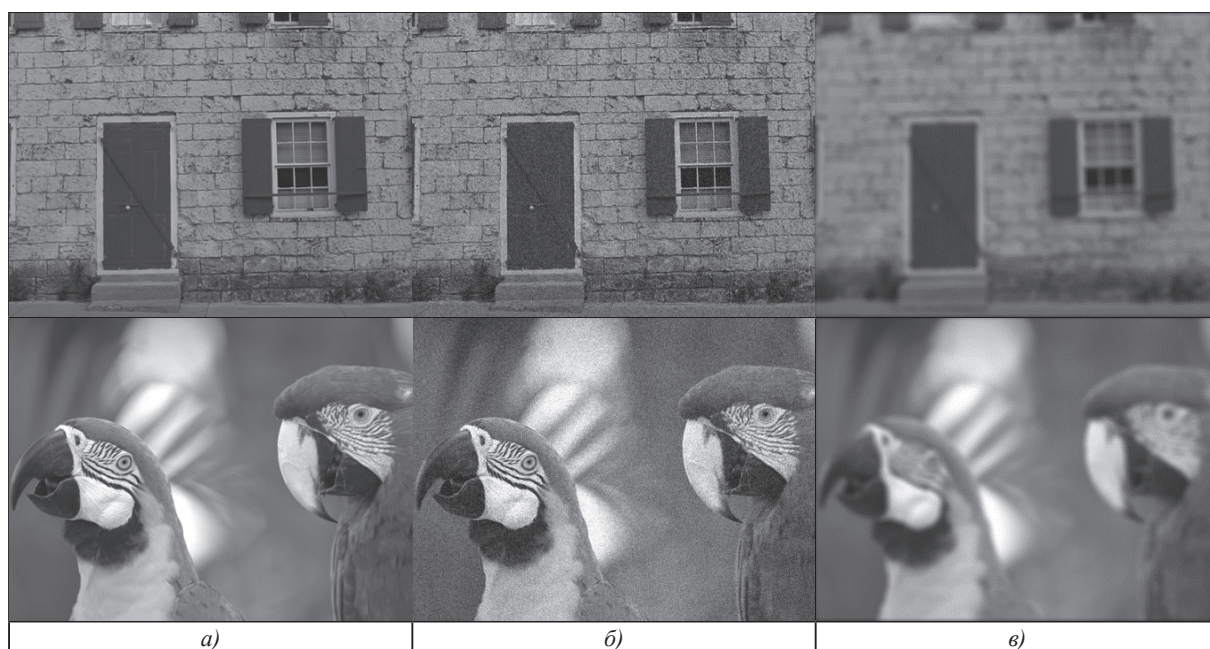


Рис. 1 – Примеры изображений из базы TID2013: а) исходное изображение, б) изображение с добавлением аддитивного гауссовского шума, в) изображение с добавлением размытия



Рис. 2 – Примеры изображений, полученных при помощи цифрового фотоаппарата Nikon D5000

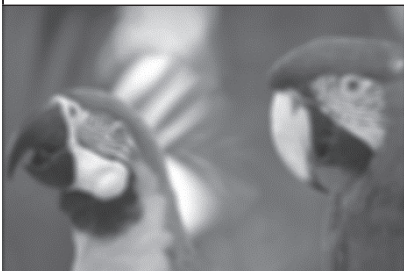
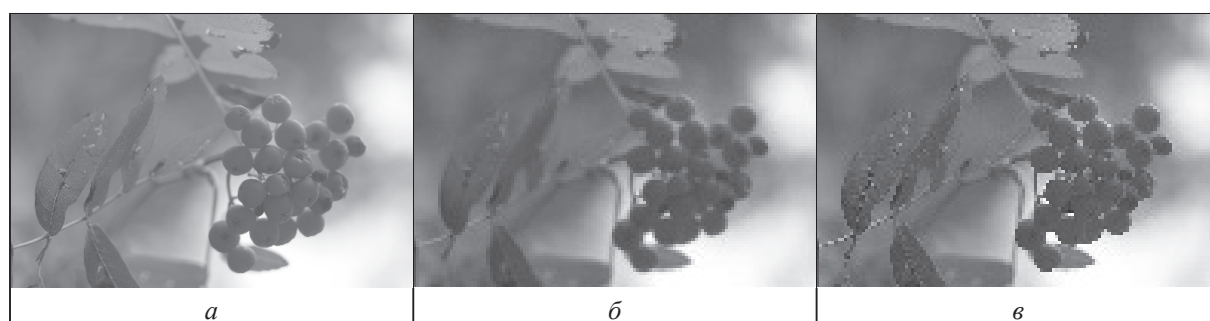
Исходные изображения базы TID2013	Уменьшенные в 2 раза изображения	
	билинейная интерполяция	интерполяция по ближайшему соседу
		
<i>а</i>	<i>б</i>	<i>в</i>
		
<i>г</i>	<i>д</i>	<i>е</i>
		
<i>ж</i>	<i>з</i>	<i>и</i>

Рис. 3 – Исходные изображения и их уменьшенные в 2 раза копии (с различными искажениями: первый ряд – добавление шума, второй ряд – размытие, третий ряд – изменение контраста)

Рис. 4 – Исходное изображение из БД Рябина *а*) и его уменьшенные в 8 раза копии: *б*) использован метод билинейной интерполяции, *в*) использован метод интерполяции по ближайшему соседу

в столбце б) рисунков 3–4 визуально кажутся более размытыми. Интерполяция методом ближайшего соседа проста в реализации, но имеет недостаток в виде усиления зубчатости границ на изображениях (рис. 4, в).

Анализ качества изображений можно разделить на два класса: объективный (количественный) и субъективный (визуальная оценка экспертов – Means Opinions Score (MOS)). Для оценки качества изображений было отобрано 22 меры – BEGH, BISH, BREN, CMO, CONT, CON3, CURV, FISH, FUS, GORD, HELM, EBCM, KURT, LAPD, LAPL, LAPM, LOCC, LOEN, SHAR, SPAR, SVDB, WAVS. Более подробно эти меры описаны в работах [4–5]. Они используются в литературе для оценки резкости, размытости, контраста изображений. Количественная оценка качества проводилась в два этапа. Первый этап – получение массива локальных мер по каждому изображению с использованием отобранных мер. Второй этап – вычисление глобальной оценки качества по полученным локальным.

В статьях [5–6] было показано, что в качестве глобальной оценки качества, объединяющей локальные меры, полученные для одного изображения, вместо параметров нормального распределения (среднее и среднеквадратичное отклонение) можно использовать другие распределения и их параметры. В рамках данной статьи для аппроксимации локальных мер качества было исследовано 16 распределений случайных величин: равномерное (uniform), нормальное (normal), логарифмическое нормальное (log-normal), экспоненциальное (exponential), гамма (gamma), Вейбулла (Weibull), логистическое (logistic), логарифмическое логистическое (log-logistic), обобщенное распределение экстремальных значений (generalized extreme value, GEV), Бирнбаума-Саундерса (Birnbauм Saunders), экстремальных значений (extreme value), обобщенное Парето (generalized Pareto), обратное Гаусса (inverse Gaussian), Накагами (Nakagami), Рэля (Rayleigh), Стюдента (t location-scale distribution) [7].

В процессе экспериментов установлено, что при уменьшении размера изображения, гистограммы распределения локальных мер сохраняют свою форму. Для изображений, уменьшенных в 8 раз гистограммы стали шире.

Далее с помощью метода максимального правдоподобия анализировалось, какие распределения точнее аппроксимируют множество локальных оценок качества отдельных изображений. Были вычислены оценки приближения для всех мер. Часть из них представлена величинами sumLL в таблице 1. В ней

Т а б л и ц а 1 – Результаты ранжирования распределений по значениям sumLL на примере меры BEGH для изображений из базы Рябина

Данные для исходных изображений (4288x2848 пк)					
Распределение	Значения первого параметра распределения		Значения второго параметра распределения		sumLL
	минимум	максимум	минимум	максимум	
nakagami	0,057621	0,100934	5,71E-06	0,001803	894125560
gamma	0,11836	0,200609	0,010197	0,154883	887131956
weibull	0,000295	0,003037	0,151184	0,273877	845454774
loglogistic	-10,2102	-7,36403	3,543508	6,413653	815700944
normal	0,001627	0,018458	0,001698	0,038234	458174508
Данные для изображений, уменьшенных в 2 раза (2144x1424 пк), bilinear					
nakagami	0,057214	0,138017	7,17E-06	0,002575	198757974
gamma	0,114155	0,287739	0,008169	0,159439	197694363
weibull	0,000289	0,003461	0,145304	0,411567	188776745
loglogistic	-10,4071	-6,74504	2,263757	6,645284	181996125
normal	0,001644	0,019675	0,002115	0,046779	96055080
Данные для изображений, уменьшенных в 2 раза (2144x1424 пк), nearest					
nakagami	0,058105	0,143724	8,08E-06	0,002991	200924082
gamma	0,116179	0,303776	0,008196	0,163405	199943225
weibull	0,000321	0,003985	0,148108	0,436197	190891240
loglogistic	-10,2092	-6,659	2,112822	6,533054	183883207
normal	0,001704	0,020846	0,002274	0,050561	96792666
Данные для изображений, уменьшенных в 4 раза (1072x712 пк), bilinear					
nakagami	0,058316	0,221444	1,86E-05	0,004996	45367826
gamma	0,119333	0,523985	0,006623	0,161595	45264045
weibull	0,000476	0,008016	0,155207	0,703367	43276266
loglogistic	-9,58934	-5,65155	1,15044	6,240113	41398201
normal	0,0023	0,02645	0,003647	0,065546	22914608
Данные для изображений, уменьшенных в 4 раза (1072x712 пк), nearest					
nakagami	0,059753	0,228006	2,21E-05	0,006114	45245513
gamma	0,123077	0,561532	0,006861	0,170817	45202572
weibull	0,000548	0,009067	0,160974	0,734224	43239603
loglogistic	-9,3006	-5,47979	1,067812	6,028302	41336885
normal	0,002396	0,028934	0,004042	0,07264	22582716
Данные для изображений, уменьшенных в 8 раза (536x356 пк), bilinear					
gamma	0,136585	0,788524	0,007719	0,173112	9980739
nakagami	0,065606	0,302881	5,65E-05	0,009226	9965037
weibull	0,001082	0,017206	0,184106	0,897152	9611925
loglogistic	-8,15709	-4,64517	0,811456	5,267594	9154056
normal	0,003752	0,039207	0,006512	0,087683	5377587
Данные для изображений, уменьшенных в 8 раз (536x356 пк), nearest					
gamma	0,141261	0,811375	0,008461	0,181578	9752221
nakagami	0,067136	0,297137	7,14E-05	0,01113	9713004
weibull	0,001241	0,01914	0,192599	0,900678	9405877
loglogistic	-7,90007	-4,53838	0,7876	5,024512	8958805
normal	0,004005	0,042909	0,007439	0,096377	5124347

представлены результаты для пяти лучших распределений и четырех вариантов размеров изображений базы Рябина.

Анализируя таблицу 1, можно заметить, что значения sumLL для первых двух распределений очень близки, аналогично для третьего и четвертого.

На рис. 5 представлена гистограмма локальных оценок LPM для одного из изображений базы TID2013 с искаженным контрастом, которая аппроксимируется несколькими распределениями. Как видно из рисунка, функция Вейбулла точнее других описывает гистограмму. Также в таблице 2 записаны отсортированные по значению sumLL шесть распределений и их значения параметров. Можно заметить, что распределение Вейбулла находится выше, чем нормальное распределение, параметры которого часто используют для различных оценок.

Т а б л и ц а 2 – Результаты ранжирования шести распределений по значениям sumLL на примере меры LPM для изображений с искаженным контрастом из базы TID2013

Данные для исходных изображений (536x356 пк)					
Распределение	Значения первого параметра распределения		Значения второго параметра распределения		Значение sumLL
	минимум	максимум	минимум	максимум	
gamma	0,06	1	17	297	-77260478
nakagami	0,03	0,4	87	9930	-77353187
weibull	0,02	62	0,07	1	-79680906
loglogistic	-11	3,8	0,64	12	-84119512
generalized pareto	-0,09	30	5,96E-16	74	-89077239
normal	6	71	7	70	-109545863
Данные для изображений, уменьшенных в 2 раза (256x192 пк), bilinear					
nakagami	0,03	0,3995	61	4192	-14379095
gamma	0,05	1,1345	19	290	-14558218
weibull	0,005	42	0,07	1,1	-15581163
loglogistic	-13	3,4	0,6	12	-16993482
generalized pareto	-0,13	30	5,4E-16	48	-19368549
normal	4,8	45	6	45	-25929255
Данные для изображений, уменьшенных в 2 раза (256x192 пк), nearest					
gamma	0,06	1,2	20	523	-23506737
nakagami	0,03	0,4	268	23649	-23657773
weibull	0,06	101	0,08	1,1	-23883344
loglogistic	-9	4	0,6	11	-24679441
generalized pareto	-0,1	32	6,5E-16	118	-25552583
normal	10	112	12	110	-30693940

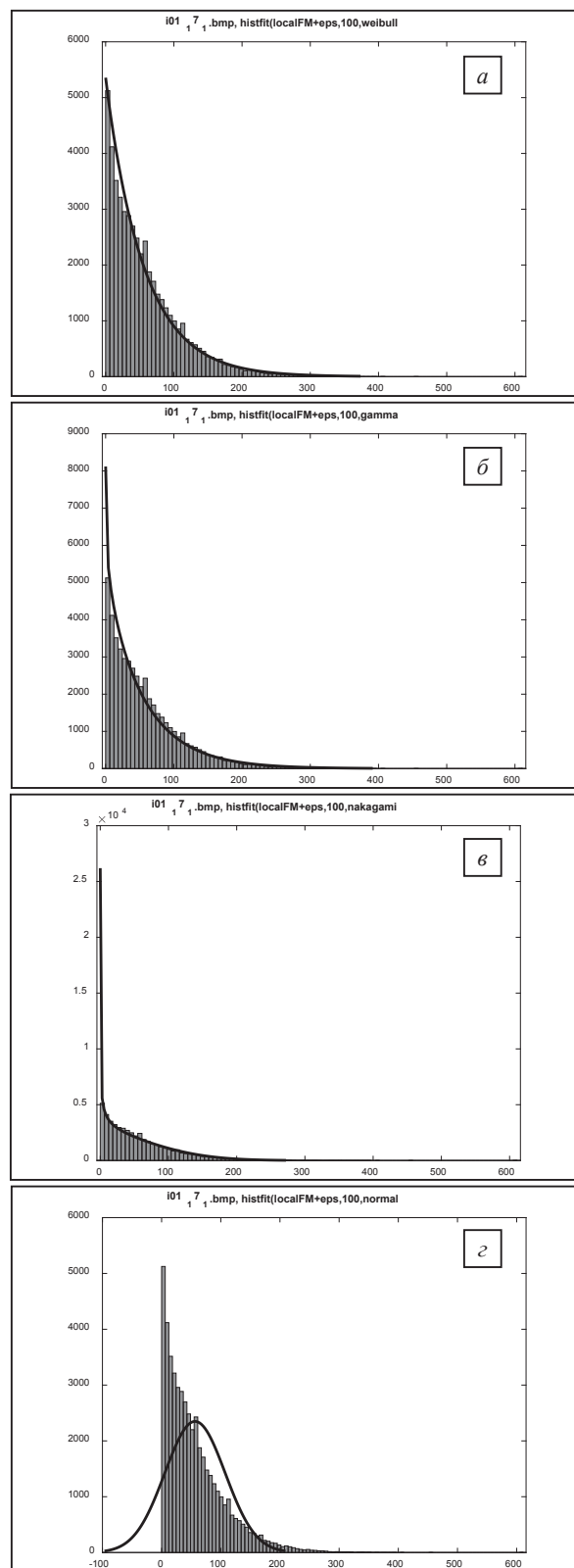


Рис. 5 – Аппроксимация гистограммы локальных признаков меры LPM:
а – распределением Вейбулла,
б – гамма распределением,
в – распределением Накагами,
г – нормальным распределением

Лучшие результаты в качестве глобальной оценки качества в проведенных экспериментах показали следующие параметры распределений: оба параметра гамма распределения (форма и масштаб), первый параметр Накагами (форма), второй параметр распределения Вейбулла (форма), параметры обобщенного распределения экстремальных значений, второй параметр логарифмического логистического распределения (масштаб).

Далее анализировалась корреляция Спирмена между визуальными оценками экспертов и разными количественными оценками качества изображений, уменьшенных в 2, 4 и 8 раз для изображений базы Рябина (таблица 4); и в 2 раза для базы TID2013 (таблица 3). Проверялась гипотеза о том, что визуальные оценки при уменьшении размера изображений не изменяются. Корреляция выше 0,7 означала хорошее совпадение количественных и визуальных оценок. Значения коэффициента корреляции меньше 0,7 в таблицах 2–3 обозначены знаком «—».

По результатам анализа таблицы 3 сделаны следующие выводы:

1. мера SHAR дает лучшие результаты по оценке качества изображений для трех видов искажений и двух способов уменьшения разрешения кадра;

2. меры EBCM, KURT показали низкую корреляцию между количественными и визуальными оценками для трех искажений и трех размеров изображений;

3. меры BEGH, CMO, CURV, GORD, HELM не стоит использовать для оценки качества изображений с аддитивным гауссовским шумом;

4. меры CONT, CON3, CURV, LOEN не стоит использовать для оценки качества изображений с размытием;

5. меры CONT, FISH, FUS, LAPL, LOEN, SVDB, WAVS не стоит использовать для оценки качества изображений с изменением контраста;

6. при использовании мер FISH, LAPD, LAPL, LAPM, SVDB, WAVS значения корреляции > 0.7 для двух видов искажений — размытие и добавление шума;

7. сравнив значения корреляций для каждой меры в третьем и четвертом, шестом

и седьмом, девятом и десятом столбцах, можно заметить, что для уменьшения размера изображения лучше использовать интерполяцию по ближайшему соседу, чем билинейную.

8. при анализе качества не все меры можно применять к уменьшенным изображениям. Например, меры BISH, SPAR, SVDB на уменьшенных изображениях с аддитивным гауссовским шумом показали результаты хуже (значения корреляции $< 0,7$), чем на изображениях исходного размера;

9. применение мер BREN, CONT, CON3, FISH, FUS, LOCC, LOEN, для изображений с добавлением аддитивного гауссовского шума дает хорошие результаты на изображениях исходного размера и уменьшенных в 2 раза с применением интерполяции по ближайшему соседу;

10. значения корреляции между MOS и количественными оценками LAPD и LAPM на изображениях размером 512×384 пикселя с измененным контрастом были меньше 0,7. Тогда как после уменьшения изображений с применением билинейной интерполяции, значения корреляции увеличились и составили 0,72 и 0,74 соответственно.

По результатам анализа таблицы 4 сделаны следующие выводы:

1. меры BREN, CONT, CURV и FUS на изображениях четырех размеров показали одинаковые значения корреляции между количественными и визуальными оценками качества;

2. для некоторых мер уменьшение размеров изображений приводит к увеличению корреляции между количественными и визуальными оценками качества, например, меры BISH, CMO, CON3, EBCM, SHAR;

3. применение мер FISH, GORD, HELM, LOEN к изображениям с меньшим размером, чем исходные, дает низкие значения корреляции между количественными и визуальными оценками. Тогда как для исходных размеров изображений, меры дают значения корреляции больше 0,7;

4. для вычисления меры BEGH, изображение не следует уменьшать больше чем в 4 раза. При большем уменьшении изображения, значения меры не соответствуют визуальным оценкам.

Т а б л и ц а 3 – Корреляция Спирмена между количественными и визуальными оценками качества изображений из базы TID2013 для трех типов искажений

Мера качества	Искажение – аддитивный гауссовский шум			Искажение – глобальное размытие			Искажение – изменение контраста		
	исходный размер	уменьш. в 2 раза, bilinear	уменьш. в 2 раза, nearest	исходный размер	уменьш. в 2 раза, bilinear	уменьш. в 2 раза, nearest	исходный размер	уменьш. в 2 раза, bilinear	уменьш. в 2 раза, nearest
	512x384 пк	256x192 пк		512x384 пк	256x192 пк		512x384 пк	256x192 пк	
BEGH	–	–	–	0,87	0,75	0,82	0,82	0,82	0,82
BISH	0,74	–	–	0,90	0,79	0,81	0,82	0,77	0,78
BREN	0,84	–	0,81	0,86	0,73	0,78	0,80	0,78	0,78
CMO	–	–	–	0,73	–	–	0,81	0,80	0,80
CONT	0,89	–	0,84	–	–	–	–	–	–
CON3	0,74	–	0,71	–	–	–	–	0,74	–
CURV	–	–	–	–	–	–	0,77	0,77	0,77
FISH	0,87	–	0,80	0,91	0,84	0,82	–	–	–
FUS	0,81	–	0,75	–	–	–	–	–	–
GORD	–	–	–	0,79	–	–	0,82	0,79	0,80
HELM	–	–	–	0,73	–	–	0,85	0,84	0,84
EBCM	–	–	–	–	–	–	–	–	–
KURT	–	–	–	–	–	–	–	–	–
LAPD	0,90	0,76	0,86	0,85	0,79	0,84	–	0,72	–
LAPL	0,90	0,80	0,82	0,86	0,83	0,84	–	–	–
LAPM	0,91	0,80	0,85	0,85	0,82	0,85	–	0,74	–
LOCC	0,88	–	0,82	0,84	–	0,80	0,80	0,78	0,80
LOEN	0,82	–	0,76	–	–	–	–	–	–
SHAR	0,86	0,71	0,84	0,84	0,72	0,80	0,76	0,76	0,76
SPAR	0,72	–	–	0,88	0,77	0,85	0,76	0,74	0,75
SVDB	0,84	–	–	0,83	0,72	0,78	–	–	–
WAVS	0,91	0,70	0,85	0,84	0,79	0,84	–	–	–

Т а б л и ц а 4 – Корреляция Спирмена между количественными и визуальными оценками качества изображений из базы Рябина

Мера качества	БД Рябина						
	Исходный размер	Уменьш. в 2 раза, bilinear	Уменьш. в 2 раза, nearest	Уменьш. в 4 раза, bilinear	Уменьш. в 4 раза, nearest	Уменьш. в 8 раза, bilinear	Уменьш. в 8 раза, nearest
Размер изображений	4288x2848 пк	2144x1424 пк		1072x712 пк		536x356 пк	
BEGH	0,76	0,76	0,76	0,81	0,81	–	–
BISH	–	–	0,81	0,72	–	0,90	0,72
BREN	0,76	0,76	0,81	0,76	0,81	0,81	0,76
CMO	0,76	–	0,81	0,81	0,85	0,85	0,85
CONT	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
CON3	–	0,86	0,85	0,81	0,81	0,94	0,85
CURV	0,90	0,90	0,90	0,81	0,85	0,90	0,90
FISH	0,76	–	–	–	–	–	–
FUS	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
GORD	0,76	–	–	–	–	–	–
HELM	0,76	–	–	–	–	–	–
EBCM	–	–	0,72	0,90	0,85	0,94	0,94
KURT	–	–	–	–	–	–	–
LAPD	–	–	–	–	–	–	–
LAPL	–	–	–	–	–	–	–
LAPM	–	–	–	–	–	–	–
LOCC	–	–	–	–	–	–	–
LOEN	0,81	–	–	–	–	–	–
SHAR	–	0,72	0,72	0,81	0,76	0,81	0,85
SPAR	0,76	0,72	0,72	–	–	0,72	0,72
SVDB	0,90	0,81	–	–	0,72	0,72	0,72
WAVS	–	–	–	0,72	0,74	–	–

3. Время вычисления мер качества и размер занимаемой памяти

Эксперименты показали, что с уменьшением размера изображения в 8 раз места для хранения изображений требуется в 25 раз меньше, а меры качества в среднем вычисляются в 80 раз быстрее (например, мера СМО вычисляется в 25 раз быстрее, мера CON3 – в 190 раз, а мера SVDB – в 290 раз). На рис. 6 представлен график зависимости времени вычисления мер от размера изображения.

В процессе экспериментов было замечено, что необходимо внимательно отслеживать настройки, которые используются редакторами при отображении, преобразовании и сохранении изображений. А также рекомендуется контролировать количество сохранений изображения перед его использованием и анализом. Т.к. даже простое копирование и вставка изображений в Microsoft Word (MS Word) может приводить к сглаживанию границ объектов на изображении (рис. 7). На рис. 7 представлены изображения из базы TID2013 с различными видами искажений, которые были вставлены в данный документ двумя способами: 1) с помощью копирования фигуры из среды MATLAB; 2) через меню «Вставка» MS Word. Визуальный анализ показывает, что границы объектов и шум на изображении рис. 7 б) более размыты, чем на изображении рис. 7 а).

Следует отметить, что выполняя одну и ту же операцию уменьшения изображения одним и тем же методом, но разными программами

можно получить отличающиеся изображения. Это подтверждается вычислением коэффициента корреляции Пирсона между изображениями из базы TID2013, которые были уменьшены в разных редакторах – MATLAB и FastStone Image Viewer [2]. Разница составляет от 0,98 для билинейной интерполяции до 0,89 для интерполяции по ближайшему соседу. Поэтому для уменьшения изображений рекомендуется использовать один редактор.

При работе с изображениями в MS Word рекомендуется настроить сжатие изображений при сохранении и качество вывода на печать. При работе в редакторе FastStone Image Viewer дополнительно следует контролировать настройки сглаживания при просмотре изображений и параметр качества при сохранении изображений.

Заключение

Эксперименты по оценке качества изображений показали, что на изображениях базы TID2013 с искусственно созданными глобальными искажениями большее количество мер качества дают хорошие результаты (корреляции с экспертными оценками больше 0,7, см. таблицу 3). Для анализа реальных изображений таких мер меньше, особенно если только часть объектов находится в зоне резкости (см. таблицу 4).

Анализ результатов экспериментов, выполненных для 22 мер качества изображений, ожидаемо показал, что нет абсолютно лучшей

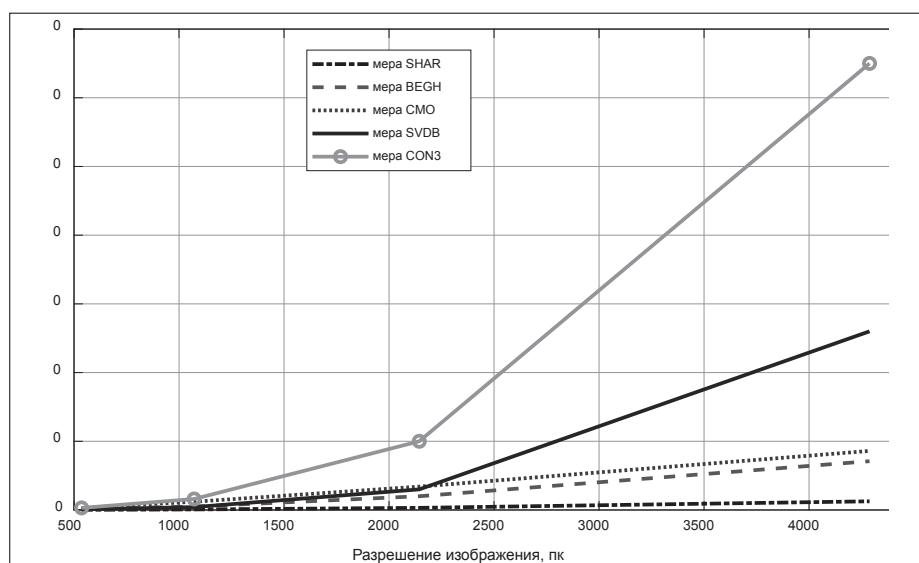


Рис. 6 – Зависимость времени вычисления мер от размера изображения

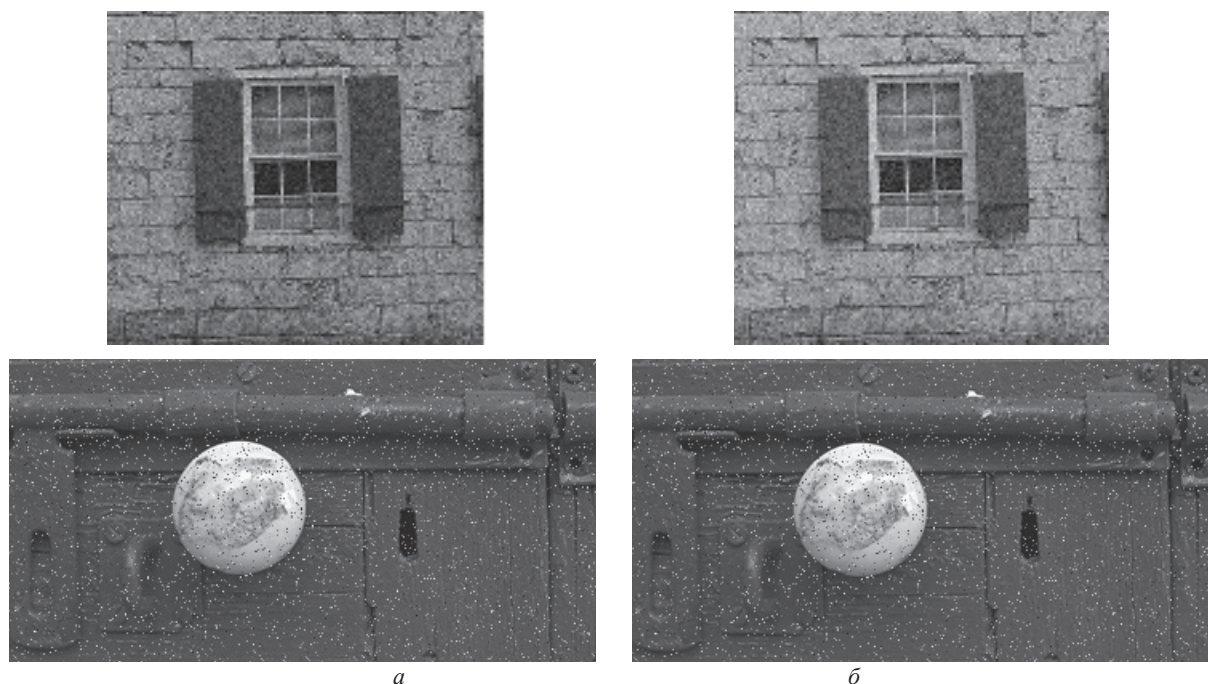


Рис. 7 – Результат вставки изображений в документ MS Word двумя способами:

- а)* изображения скопированы из фигуры среды MATLAB;
- б)* изображения вставлено через меню «Вставка» MS Word

меры для всех возможных типов искажений изображений. Для определенных типов искажений (размытие, изменение контраста, добавление шума и т.п.) можно подобрать количественную меру, которая будет точнее других соответствовать визуальным оценкам. Можно также сформулировать следующие общие рекомендации: в виде единой оценки вместо средней величины множества локальных оценок качества (это один из двух параметров нормального распределения) лучше использовать параметры других распределений, например, параметр форма распределений Вейбулла, Накагами, гамма. Временные затраты на их вычисление очень малы если уменьшить анализируемые изображения. При этом оценки на базе указанных распределений будут незначительно отличаться от оценок, вычисленных для изображений исходного размера.

При экспресс-анализе качества цифровых изображений можно использовать их уменьшенные копии, а для уменьшения лучше применять интерполяцию методом ближайшего соседа. Причем она легко реализуется посредством выбора пикселей для вычисления локальных оценок с некоторым шагом. При этом сокращается время вычислений, что важно при получении оценок на этапе

регистрации изображений для отбраковывания некачественных.

Мера KURT показала плохую корреляцию с MOS-оценками для всех изображений, использованных в экспериментах. При уменьшении разрешения изображений базы Рябина даже в 2 раза меры FISH, GORD, HELM, LOEN дали снижение корреляции с MOS до 0,5. Мера BISH для изображений базы TID2013 с добавлением шума и меры GORD, HELM для изображений базы TID2013 с размытием также показали плохие результаты при снижении размеров изображений.

Только мера SHAR показала хорошие результаты при оценке качества для всех исследованных в статье типов искажений представленных на изображениях базы TID2013. Для нее все значения коэффициента корреляции Спирмена между экспертными MOS-оценками и количественными оценками были выше 0,7. Для изображений из базы Рябина данная мера также показала хорошую корреляцию на уменьшенных изображениях.

Меры BEGH, BISH, BREN, LOCC, SPAR можно использовать на уменьшенных в 2 раза изображениях с глобальным размытием и изменением контраста. Это подтверждено экспериментами на изображениях базы TID2013. Меры

LAPD, LAPL, LAPM, WAVS допустимо использовать при оценке качества изображений с глобальным размытием или гауссовским шумом посредством уменьшения их в 2 раза.

Меры BREN, CONT, CURV и FUS на реальных изображениях, представленных в базе

Рябина, показали одинаковые значения корреляции между количественными и визуальными оценками качества для разных вариантов уменьшения. Поэтому при использовании данных мер допустимо уменьшать размер изображений в 8 раз при анализе их качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ponomarenko, N.** Image database TID2013: Peculiarities, results and perspectives / N. Ponomarenko, L. Jin, O. Ieremeiev, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola, B. Vozel, K. Chehdi, M. Carli, F. Battisti, C.-C. Jay Kuo // *Signal Processing: Image Communication*. – 2015. – V. 30. – P. 57–77.
2. FastStone Image Viewer – программа для просмотра изображений в Microsoft Windows [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.faststone.org/> (дата обращения 05.05.2020).
3. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений. Техносфера // Москва. – 2006. – 1072 с.
4. **Pertuz S., Puig D., Garcia M.A.** Analysis of focus measure operators for shape-from-focus. *Pattern Recognition*. – 2013. – № 46(5). – P. 1415–1432.
5. **Старовойтов, Ф.В.** Параметры кривой распределения локальных оценок как меры качества изображений / Ф.В. Старовойтов, В.В. Старовойтов // *Системный анализ и прикладная информатика*. – 2018. – № 3. – С. 26–41.
6. **Голуб Ю.И.** Исследование безэталонных локальных оценок качества изображений / Ю.И. Голуб, Ф.В. Старовойтов, В.В. Старовойтов // *Вестник БрГТУ*. – 2019. – № 5(118): Физика, математика, информатика. – С. 15–18.
7. **Leemis, L.M.** Univariate distribution relationships / L. M. Leemis, J. T. McQueston // *The American Statistician*. – 2008. – V. 62. – № 1. – P. 45–53.

REFERENCES

1. **Ponomarenko, N.** Image database TID2013: Peculiarities, results and perspectives / N. Ponomarenko, L. Jin, O. Ieremeiev, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola, B. Vozel, K. Chehdi, M. Carli, F. Battisti, C.-C. Jay Kuo // *Signal Processing: Image Communication*. – 2015. – V. 30. – P. 57–77.
2. FastStone Image Viewer – программа для просмотра изображений в Microsoft Windows [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.faststone.org/> (дата обращения 05.05.2020).
3. **Gonzalez R., Woods R.** Digital image processing. Technosfera // Moscow. – 2006. – 1072 p.
4. **Pertuz S., Puig D., Garcia M.A.** Analysis of focus measure operators for shape-from-focus. *Pattern Recognition*. – 2013. – № 46(5). – P. 1415–1432.
5. **Starovoitov F.V.** Parameters of the curve of local estimate distribution as image quality measures / Starovoitov F.V., Starovoitov V.V. // *System analysis and applied information science*. – 2018. – № 3. – P. 26–41.
6. **Golub Y.I.** Study of no-reference local image quality assessments / Y. I. Golub, F. V. Starovoitov, V. V. Starovoitov // *Vestnik BrSTU*. – 2019. – № 5(118): Physics, Mathematics, Computer Science. – P. 15–18.
7. **Leemis, L.M.** Univariate distribution relationships / L. M. Leemis, J. T. McQueston // *The American Statistician*. – 2008. – V. 62. – № 1. – P. 45–53.

Поступила
01.05.2020

После доработки
29.05.2020

Принята к печати
01.06.2020

Y.I. GOLUB¹, F.V. STAROVOITOV², V. V. STAROVOITOV¹

IMPACT OF IMAGE SIZE REDUCING FOR IMAGE QUALITY ASSESMENT

¹ *United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus,*

² *Belarusian National Technical University*

The article describes studies of the effect of image reduction on the quantitative assessment of their quality. Image reduction refers to the proportional reduction of horizontal and vertical image resolutions in pixels. Within the framework of these studies, correlation analysis between quantitative assessments of image quality and subjective assessments of experts was performed. For the experiments, we used images from the public TID2013 database with a resolution of 512 × 384 pixels and expert estimates of their quality, as well as photographs taken with a Nikon D5000 digital camera with a resolution of 4288 × 2848 pixels. All images were reduced in 2, 4 and 8 times. For this two methods were used: bilinear interpolation and interpolation by the nearest neighbor.

22 measures were selected to evaluate image quality. Quantitative assessment of image quality was calculated in two stages. At the first stage, an array of local estimates was obtained in the vicinity of each pixel using the selected measures. At

the second stage, a global quality assessment was calculated from the obtained local ones. To summarize local quality estimates, the parameters of 16 distributions of random variables were considered.

According to the results of the experiments, it was concluded that the accuracy of the quality assessment for some measures decreases with image reduction (for example, FISH, GORD, HELM, LOEN measures). BREN and SHAR measures are recommended as the best. To reduce images, it is better to use the nearest neighbor interpolation method. At the same time, the computation time of estimates is reduced on average by 4 times while reducing images by 2 times. When images are reduced by 8 times, the calculation time decreases on average by 80 times. The amount of memory required to store the reduced images is 25 times less.

Keywords. Digital image, image quality assessment, image reduction, image resolution, Spearman correlation, distribution of random variables



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.



Старовойтов Федор Валерьевич – аспирант Белорусского национального технического университета.

Fedor V. Starovoitov is a PhD student of the Belarusian National Technical University.



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

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.

В. С. ДЕМЕШКО, А. И. ФЁДОРОВ

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ПОДСИСТЕМЕ РАЗВЕДКИ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Военная академия Республики Беларусь

В статье предложена структура комплексной системы безопасности площадных объектов. Рассмотрены основные подсистемы, входящие в её состав. Определены задачи подсистеме разведки по обнаружению и распознаванию наземных объектов наблюдения в сложной фоноцелевой обстановке.

Задача обнаружения объекта наблюдения решалась на основе предложенного ранее алгоритма. Недостатком данного алгоритма являлось наличие ложных срабатываний от мерцающей сложной фоноцелевой обстановки. Для устранения данного недостатка предложено применить классификатор на основе сверточной нейронной сети, который распределяет выделенные объекты по конкретным классам.

Проведен анализ и экспериментальные исследования по оценке точности распознавания наземных объектов такими сверточными архитектурами как VGG-16, VGG-19, Inception v3, ResNet-50, MobileNet. Обучение и проверка качества распознавания данных архитектур проводилось на экспериментально созданном наборе данных с изображением человека на контрастном фоне и на различных дальностях. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения сверточной нейронной сети в системе охраны и её способность работать в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: подсистема разведки, средства оптико-электронной разведки, изображение, обнаружение, распознавание, классификатор, сверточная нейронная сеть, архитектура.

Введение

Вопросом охраны важных государственных, военных и экономических объектов уделяется достаточное внимание. К таким объектам можно отнести административные центры, промышленные предприятия, электростанции, аэропорты и аэродромы (гражданского и военного назначения), воинские части т.д. [1].

Каждый из вышеприведенных объектов представляет собой площадной объект.

Основными пространственными характеристиками площадного объекта является его длина, ширина и периметр, а с точки зрения обеспечения безопасности – требуемое расстояние от внешней границы объекта охраны, на котором обеспечивается своевременное обнаружение наземного противника и принятия решения и мер по его ликвидации.

В качестве типового площадного объекта, для примера рассмотрим аэродром, имеющего пространственные характеристики:

- длина 3,5–4,5 км;
- ширина 1,5–2 км;
- периметр 10–12 км.

Для обеспечения своевременного обнаружения объекта наблюдения (типа нарушитель) и своевременного принятия мер к нему (задержание или ликвидации), дальность его обнаружения должна составлять 25–300 м [2].

В настоящее время его охрана и оборона осуществляется, как правило, только с привлечением личного состава из числа взвода охраны и обороны. К сожалению, необходимо констатировать факт, что для охраны внешнего периметра объекта личному составу из технических средств выделяются только бинокли и переносные радиостанции.

Опыт проводимых учений различного уровня показывает, что много недостатков отмечалось как к организации охраны аэродрома, так и к организации охраны позиций, которые в основном осуществлялись путем патрулирования и выставления дозоров [3].

В связи с этим проблема обеспечения комплексной системы безопасности охраняемого площадного объекта является актуальной задачей.

Основная часть

В [4] была предложена структура комплексной системы безопасности для площадного объекта, включающая в себя три подсистемы: подсистему разведки, противодействия и управления (рис. 1).

Подсистема разведки включает в себя: средства оптико-электронной разведки, средства радиолокационной разведки, средства радиотехнической разведки, систему датчиков наземной охраны и предназначена для ведения воздушной, наземной и радиоэлектронной разведки.

Подсистема управления включает в себя средства обработки информации и поддержки принятия решений, средства документирования и объективного контроля, средства информационного обмена с КСА и предназначена для координации действий и непосредственного управления исполнительными элементами подсистем разведки и противодействия, а также информационного обмена с сопрягаемым внешним пунктом управления.

Подсистема противодействия включает в себя средства радиоэлектронного подавления, средства огневого поражения, средства аэрозольной маскировки и предназначена для радиоэлектронного подавления и огневого поражения воздушных и наземных целей.

Две последние подсистемы включаются в работу, если своевременно сработала подсистема разведки.

Одной из задач подсистемы разведки является обнаружение наземного противника. Особая роль в этой задаче отводится средствам оптико-электронной разведки, которые должны обнаружить и распознать объект наблюдения. В соответствии с требованиями к подсистеме разведки, дальность обнаружения наземных объектов должна обеспечивать своевременное принятие мер, направленное на их задержание или ликвидацию. При этом задача обнаружения и распознавания объекта наблюдения должна решаться полностью в автоматическом (автоматизированном) режимах и в реальном масштабе времени.

Сложность обнаружения наземного объекта по сравнению с воздушным объясняется более сложной фоноцелевой обстановкой.

Обнаружение и распознавание воздушной цели осуществляется на небесном фоне, представляющем собой, как правило, однородный фон определенного цвета (голубое небо, сплошная серая облачность или их комбинация с различными оттенками).

Обнаружение и распознавание наземных объектов осуществляется, как правило, в условиях сложной фоноцелевой обстановке. Этот



Рис. 1 – Структурная схема комплексной системы безопасности

фактор обусловлен мерцанием фона при наличии ветра и солнечных лучей (шелест листьев, травы, кустарника, деревьев, различные комбинации рельефа местности в сочетании с различной комбинацией растительного покрова).

Процесс обнаружения и распознавания наземных объектов еще более затруднен или невозможен, если объект наблюдения использует маскировочные свойства местности или подбегает к объекту прикрытия в маскировочном халате, сливающимся с местностью.

Разработанные алгоритмы обнаружения и распознавания наземных объектов в существующих технических системах, способны нормально работать в простых фоновых условиях на малых расстояниях при хорошо видимых и контрастных объектах наблюдения (распознавание номерных знаков автомобилей, лиц в пунктах контроля пропуска, обнаружение человека камерой видеонаблюдения при входе-выходе из здания и т.д.).

В [4] был предложен алгоритм обнаружения и выделения наземных объектов, наблюдаемых в сложной фоновой обстановке (присутствие контрастного фона, интенсивного шума, заслонение объекта фоном).

По результатам экспериментальных исследований проверки качества обнаружения и выделения наземных объектов была построена зависимость частоты правильного выделения объекта $\hat{P}_{пв}$ от частоты ложного выделения объекта $\hat{P}_{лв}$, аналитическую зависимость которой можно определить по формулам:

$$\hat{P}_{пв} = M \left[\frac{\sum_{i=0}^{N_x-1} \sum_{j=0}^{N_y-1} \hat{r}(i, j, n) r(i, j, n)}{\sum_{i=0}^{N_x-1} \sum_{j=0}^{N_y-1} r(i, j, n)} \right], \quad (1)$$

$$\hat{P}_{лв} = M \left[\frac{\sum_{i=1}^{N_x-1} \sum_{j=1}^{N_y-1} \hat{r}(i, j, n) (1 - r(i, j, n))}{\sum_{i=0}^{N_x-1} \sum_{j=0}^{N_y-1} (1 - r(i, j, n))} \right],$$

где $r(i, j, n)$ – эталонная бинарная маска;
 $\hat{r}(i, j, n)$ – бинарная маска, полученная с помощью алгоритма;

M – символ усреднения по нескольким кадрам;

N_x, N_y – размеры изображения по вертикали и горизонтали соответственно.

На рис. 2 показаны зависимости $\hat{P}_{пв}$ от $\hat{P}_{лв}$ предложенного алгоритма и известного алгоритма [5], использующего максмедианную фильтрацию. При этом, размерность масок варьировалась от значения 11 до 41.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать о преимуществе разработанного алгоритма обнаружения при наблюдении объектов размерами более 20x20 пикселей по сравнению с подходом, использующим максмедианную фильтрацию. Прирост частоты правильного обнаружения объекта составляет до 30 % при одном и том же значении ложных тревог 0,005.

Однако, несмотря на полученные преимущества, необходимо отметить, что данный алгоритм выделяет не только объект наблюдения, но и даёт ложные срабатывания

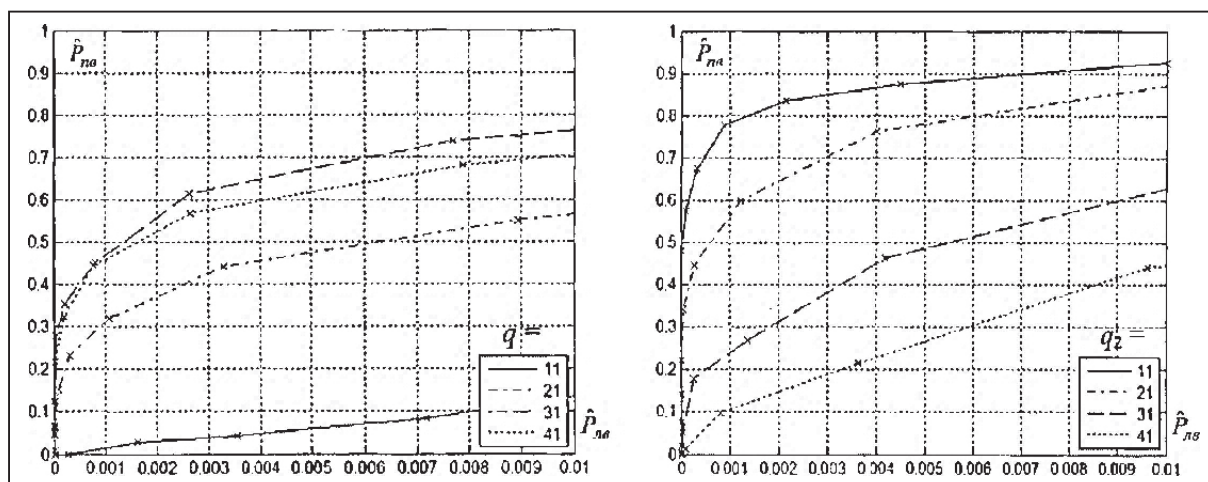


Рис. 2 – Зависимости $\hat{P}_{пв}$ от $\hat{P}_{лв}$ предложенного алгоритма (рисунок справа) и алгоритма основанного на максмедианной фильтрации (рисунок слева)

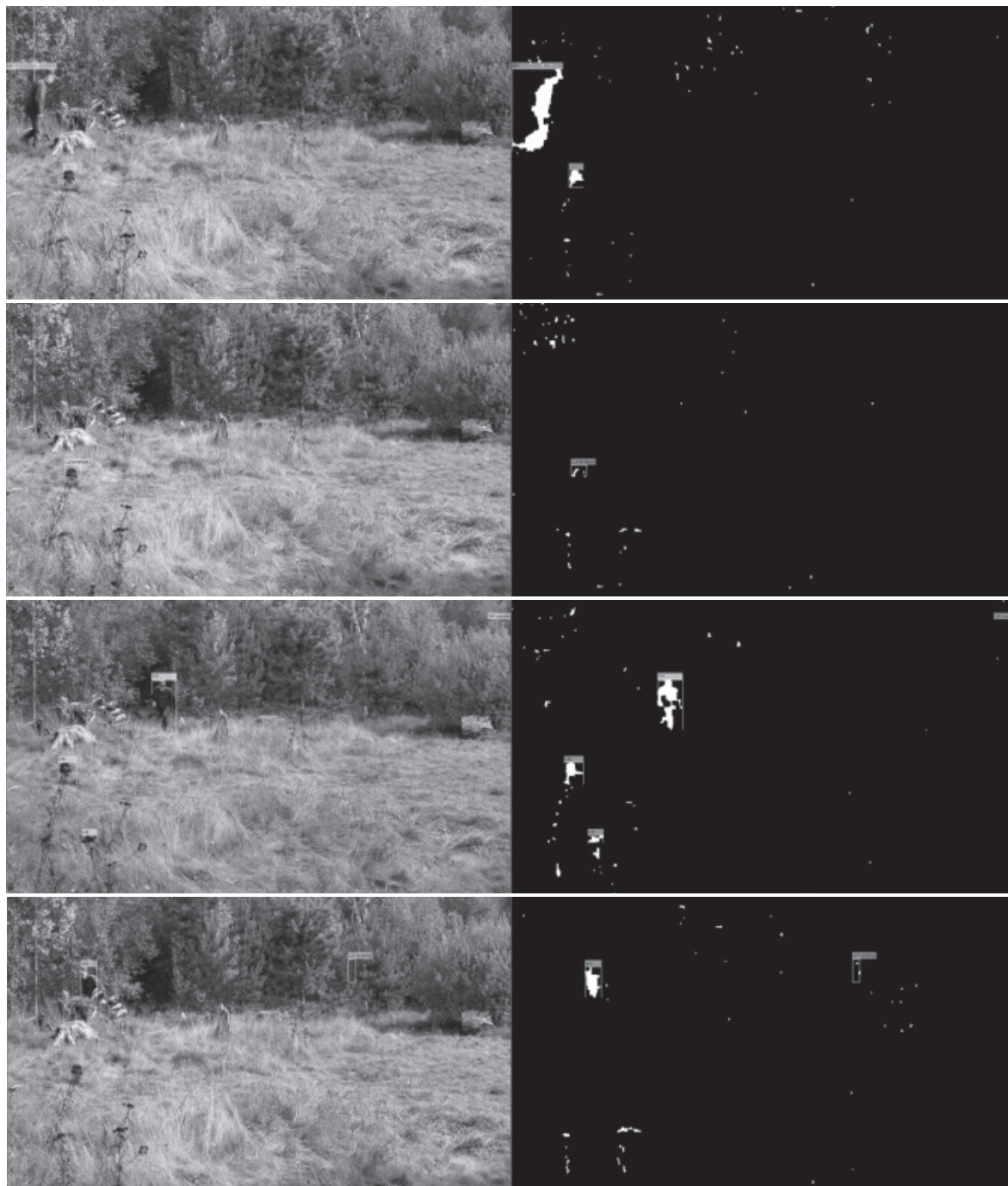


Рис. 3 – Визуальная оценка работы разработанного алгоритма

в ближней зоне наблюдения. Примеры ложных срабатываний представлены на рис. 3.

Для устранения ложных срабатываний предлагается на конечном этапе работы разработанного алгоритма, добавить классификатор, который будет распределять выделенные наземные объекты по конкретным классам (человек, транспортное средство, животное и т.д.) и выводить вероятность принадлежности объекта к конкретному классу на

экран оператора. Общую структурную схему классификатора можно представить в виде (рис. 4).

В настоящее время для решения задач классификации (распознавания) наземных объектов на телевизионных изображениях наиболее перспективным является метод на основе сверточных нейронных сетей.

Сверточная нейронная сеть (СНС) – специальная архитектура искусственных нейронных

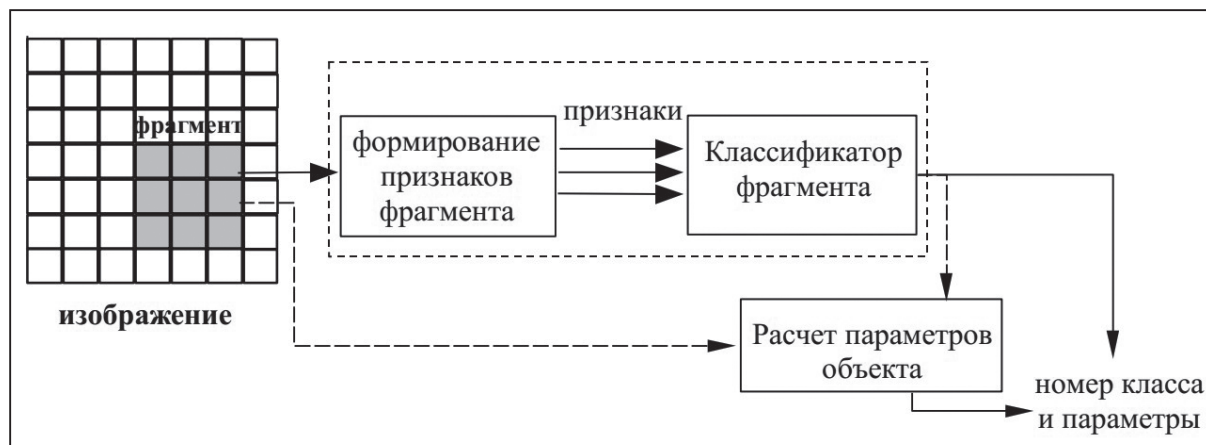


Рис. 4 – Общая структурная схема классификатора наземных объектов

сетей, предложенная Яном Лекуном в 1988 году и нацеленная на эффективное распознавание образов, входит в состав технологий глубокого обучения [6].

Для качественного распознавания объекта наблюдения необходимо решить три задачи: создать базу данных с изображениями объектов наблюдений, построить адекватную модель архитектуры СНС и провести её обучение.

Наибольшего успеха в области классификации изображений достигли решения, основанные на глубоких сверточных сетях, в частности, на таких архитектурах, как VGG-16, VGG-19, Inception v3, ResNet-50, MobileNet [7].

С целью сравнительного анализа вышеописанных архитектур применительно к решению задачи классификации наземных объектов, каждая архитектура была обучена на наборе данных с изображением человека в зависимости от его положения и контрастности, на дальности от 25 до 300 м, снятых на камеру Canon EOS550D с дискретностью 25 м.

Примеры некоторых полученных изображений на дальности от 25 м до 100 м представлены на рис. 5.

Данный набор содержит по 1 тыс. изображений для каждой дальности. При этом тестовая выборка составляет 20 %, а обучающая выборка 80 % от всего объема изображений. Параметры обучения приведены в таблице 1.

Результаты оценки точности приведены в таблице 2.

Таким образом, видно, что лучшим показателем точности обладает алгоритм классификации на основе архитектуры Inception v3.

Т а б л и ц а 1 – Параметры обучения нейронной сети

Число шагов, тыс	Размер мини-батча	Алгоритм оптимизации	Начальный темп обучения	Момент	Коэффициент затухания
9	32	SGD	0,001	0,9	10^{-3}

Т а б л и ц а 2 – Результаты оценки точности

Название модели	Количество параметров сети, млн	ACC (точность), %	Время обработки одного кадра, с
VGG-16	138	61,9	2,2
Inception v3	23	83,2	1,1
ResNet-50	25	70,1	0,8
MobileNet	4	77,9	0,2

Согласно [8] точность работы сети можно оценить по формуле:

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad (2)$$

где TP – число истинно-положительных решений;

TN – число истинно-отрицательных решений;

FP – число ложно-положительных решений;

FN – число ложно-отрицательных решений.

Из полученных результатов видно, что время обработки одного кадра данной архитектурой в 10 раз больше, чем обработка одного кадра архитектурой MobileNet.

Вместе с тем точность классификации данной сети на 6 % лучше, чем точность классификации архитектуры MobileNet.

Визуальная оценка работы классификатора с использованием модели архитектуры Inception v3 на различных видеосюжетах представлена на рис. 6.

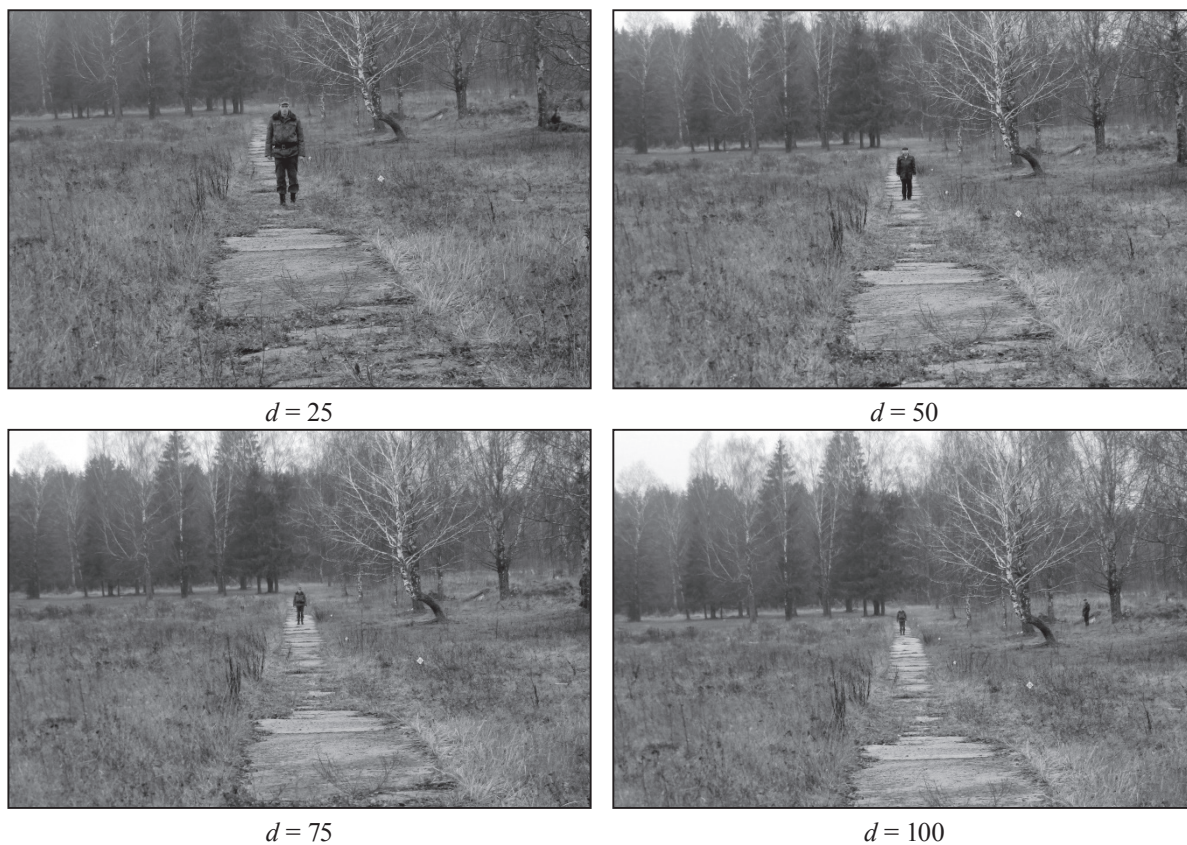


Рис. 5 – Примеры полученных изображений в зависимости от его контрастности, на дальности от 25 м до 100 м

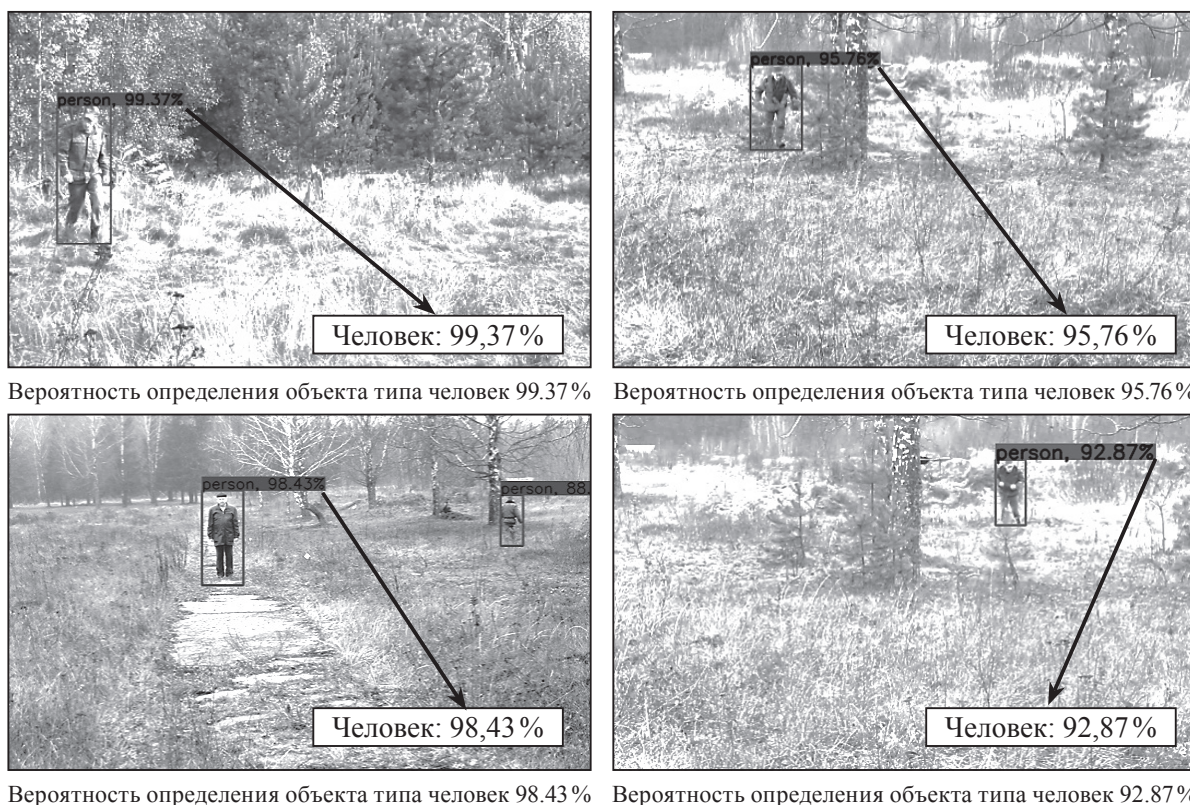


Рис. 6 – Результаты работы классификатора на основе СНС

Закключение

Предложена комплексная система безопасности площадного объекта, отвечающая требованиям современных угроз.

Применение СНС в предложенной комплексной системе безопасности площадного

объекта позволило исключить ложные срабатывания, вызванные мерцанием сложной фоноцелевой обстановки, и повысить вероятность распознавания наземных объектов наблюдения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Силы специальных и психологических операций вооруженных сил иностранных государств. Учебное издание – Минск: ВА РБ, 2013.
2. Кузяк, А. Н. Анализ применения сил специальных операций США и НАТО в современных условиях / А. Н. Кузяк, В. И. Гринюк // сбор. науч. стат. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2018. – № 34 – С. 93–98.
3. Учения: «террористы» захватили военный аэродром в Бобруйске . [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bobruisk.ru/news/2013/09/24/35161> – Дата доступа: 10.04.2020.
4. Демешко В. С., Фёдоров А. И. Комплексная система безопасности площадных объектов // Актуальные проблемы современной науки: сборник статей XIII Межд. науч. конф. г. Актобе: 2019. – с. 248–254.
5. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005.
6. Николенько С. Глубокое обучение. / С. Николенько, А. Кудрин, Е. Архангельская – СПб.: Питер, 2018. – 480 с.
7. C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, D. Erhan, V. Vanhoucke, A. Rabinovich. Going Deeper with Convolutions. Proceedings of IEEE Conference Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2015). June 7–12, 2015, Pp. 1–12.
8. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.

REFERENCES

1. Forces of special and psychological operations of the armed forces of foreign states. Textbook – Minsk: VA RB, 2013.
2. Kuzyak, A. N. Analysis of the use of special operations forces of the USA and NATO in modern conditions / A. N. Kuzyak, V. I. Grinyuk // collection of scientific. Stat. War. Acad. Rep. Belarus. – 2018. – № 34 – S. 93–98.
3. Exercises: «terrorists» seized a military airfield in Bobruisk. [Electronic resource]. – Access mode: <https://bobruisk.ru/news/2013/09/24/35161> – Access Date: 04/10/2020.
4. Demeshko V. S., Fedorov A. I. Integrated security system of areal facilities // Actual problems of modern science: collection of articles XIII Int. scientific conf. Aktobe: 2019. – p. 248–254.
5. Gonzalez R. Digital image processing / R. Gonzalez, R. Woods. – M.: Technosphere, 2005.
6. Nikolenko S. Deep learning. / S. Nikolenko, A. Kudrin, E. Arkhangelskaya – St. Petersburg: Peter, 2018. – 480 p.
7. C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, D. Erhan, V. Vanhoucke, A. Rabinovich. Going Deeper with Convolutions. Proceedings of IEEE Conference Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2015). June 7–12, 2015, Pp. 1–12.
8. Khaikin S. Neural Networks: A Complete Course, Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd ed. – M.: Williams, 2006. – 1104p.

Поступила
01.04.2020

После доработки
07.04.2020

Принята к печати
01.06.2020

DEMESHKO V.S., FEDOROV A.I.

APPLICATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS IN THE INTELLIGENCE SECURITY SYSTEM SUBSYSTEM

Military academy of the Republic of Belarus

The article proposes the structure of an integrated security system for areal facilities. The main subsystems included in its composition are considered. The tasks of the intelligence subsystem for detecting and recognizing ground-based objects of observation in a complex phono-target environment are defined.

The task of detecting an object of observation was solved on the basis of a previously proposed algorithm. The disadvantage of this algorithm was the presence of false positives from a flickering complex phono-target environment. To eliminate this drawback, it is proposed to apply a classifier based on the convolutional neural network, which distributes the selected objects to specific classes.

The analysis and experimental studies to evaluate the accuracy of recognition of ground objects by convolutional architectures such as VGG-16, VGG-19, Inception v3, ResNet-50, MobileNet. Training and verification of the recognition quality of

architecture data was carried out on an experimentally created data set with a human image on a contrasting background and at different ranges. The results obtained indicate the possibility of using a convolutional neural network in the security system and its ability to work in real time.

Keywords: intelligence subsystem, optoelectronic intelligence tools, image, detection, recognition, classifier, convolutional neural network, architecture.



Демешко Виктор Сергеевич, магистр технических наук учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

E-mail: demeka_v@mail.ru

Demeshko Victor Sergeevich, master of technical sciences educational establishment «Military academy of the Republic of Belarus».

Мобильный телефон для связи (персональный): +375292112227



Фёдоров Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

E-mail: alexandr_fedorov_1959@mail.ru

Fedorov Aleksandr Ivanovich, PhD, Associate Professor establishment «Military academy of the Republic of Belarus».

Мобильный телефон для связи (персональный): +375297622857

С. Ч. ДОНГ, В. С. ИОНИН

ОРГАНИЗАЦИЯ ХРАНЕНИЯ И ПОИСКА ОБРАЗА ЛИЦА В ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ БАЗЕ ЛИЦ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Целью работы является разработка алгоритма функционирования системой распознавания лиц с использованием объектно-ориентированных баз данных. Система обеспечивает автоматическую идентификацию искомого объекта или идентифицирует кого-либо по цифровой фотографии или видеокадру из видеисточника. Технология включает сравнение предварительно сканированных элементов лица из полученного изображения с прообразами лиц, хранимых в базе данных. Современные пакеты объектно-ориентированных баз данных дают пользователю возможность создания нового класса с заданными атрибутами и методами, получения классов, наследующих атрибуты и методы от суперклассов, создавать экземпляры класса, каждый из которых обладает уникальным объектным идентификатором, извлекать эти экземпляры по одному или группами, а также загружать и выполнять эти процедуры. Использование в алгоритме свёрточной нейронной сети позволяет осуществить переход от конкретных особенностей изображения к более абстрактным деталям.

Ключевые слова: *распознавание лиц, активные модели внешнего вида, активные модели формы, объектно-ориентированная база данных, связь между данными, абстрактные типы данных, идентификатор.*

Введение

Система распознавания лиц (СРЛ) – это компьютерное приложение, автоматически идентифицирующее физическое лицо по цифровой фотографии или видеокадру из видеисточника. Один из способов сделать это – сравнение соответствия полученных таким образом элементов его лица с набором изображений, хранящихся в созданной базе данных. При нахождении в ней соответствующего изображения задача будет решена или не решена, если идентичное изображение не хранится в этой базе. В общем случае при сканировании создается образ физического лица, сохраняемый в блоке памяти в виде соответствующей ему графической информации. При необходимости к ней добавляют текстовую информацию, которой характеризует в достаточной мере это лицо (Ф.И.О., возраст, адрес и др.). Идентификация лица предполагает хранение его прообраза в базе данных, что предъявляет к ней необходимость наличия прообразов достаточно большого количества физических лиц для выполнения задачи поиска. СРЛ часто используется в системах безопасности и может сравниваться с другими биометрическими формами, такими как системы распознавания отпечатков пальцев или радужной оболочки

глаза. Некоторые алгоритмы распознавания лиц идентифицируют черты лица, извлекая границы или признаки из изображения лица субъекта. Из них алгоритм извлекает информацию. В дальнейшем эти функции используются для поиска других изображений с аналогичными функциями. Для решения задачи идентификации необходимо сохранить информацию о лице для запоминания в виде модели прообраза его изображения. Алгоритм упрощает набор изображений лиц, сжимает данные лиц, сохраняя только данные изображений, полезные для распознавания лиц. Затем идентификатор сравнивает изображение модели с сохраненными данными лица. Хранение набора графической и текстовой информации предполагает необходимость использования объектно-ориентированных баз данных.

Связь между данными

В настоящее время в системах технического зрения для решения задачи распознавания лиц используются различные методы: гибкого сравнения на графах, нейронных сетей, скрытых марковских моделей, главных компонент, активных моделей внешнего вида (*Active Appearance Models – AAM*) и активных моделей формы (*Active Shape Models – ASM*) и др.

Несмотря на большое разнообразие представленных алгоритмов, общую структуру процесса распознавания лиц можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 1 [1].

Связь направленности объектно-ориентированных баз данных с направленностью дедуктивных баз данных носит двоякий характер [2]. Во-первых, для структуризации дедуктивных (и вообще логических) баз данных в последнее время стремятся использовать парадигму объектной ориентированности [3]. Во-вторых, некоторые механизмы дедуктивных баз данных можно использовать в контексте обычных объектно-ориентированных баз данных. Это, прежде всего, относится к языкам запросов [4]. Одно из направлений развития декларативных языков запросов объектно-ориентированных баз данных – дедуктивные языки [5, 6]. На логическом выводе основываются в распознавании лиц доказательства корректности схемы объектно-ориентированных баз данных и динамический контроль целостности.

Структуры данных в реляционной модели базируются на плоских нормализованных отношениях, ограничения целостности выражаются с помощью средств логики первого порядка и, наконец, манипулирование данными осуществляется на основе реляционной алгебры или равносильного ей реляционного исчисления. Своим успехом реляционная модель данных во многом обязана тому, что опирается на строгий математический аппарат теории множеств, отношений и логики первого порядка. Основными структурными элементами реляционной таблицы являются поле и запись. Поле (столбец реляционной

таблицы) – элементарная единица логической организации данных, которая соответствует конкретному атрибуту информационного объекта. Например, в виде реляционной таблицы можно представить информацию об объектах для распознавания лиц (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что *John Wick* – это класс, который содержит переменные объекта и сообщения объектно-ориентированных баз данных. Он также широко поддерживает наследование, поскольку в базе данных может быть много классов с похожими методами, переменными и сообщениями. Таким образом, концепция иерархии классов поддерживается для отображения сходства между различными классами.

Концепция инкапсуляции, которая является сокрытием данных или информации, также поддерживается объектно-ориентированной моделью данных. И эта модель данных также предоставляет возможность абстрактных типов данных помимо встроенных типов данных, таких как *char*, *int*, *float*. Абстрактные типы данных *ADT* (*abstract data types*) – это определяемые пользователем типы данных, которые содержат значения внутри него, а также могут иметь прикрепленные к ним методы.

Таким образом, объектно-ориентированные базы данных предоставляют пользователям множество возможностей, как встроенных, так и пользовательских. Этот класс объединяет свойства объектно-ориентированной модели данных с системой управления базами данных. Он поддерживает концепцию программирования парадигм, таких как классы и объекты, наряду с поддержкой других концепций,

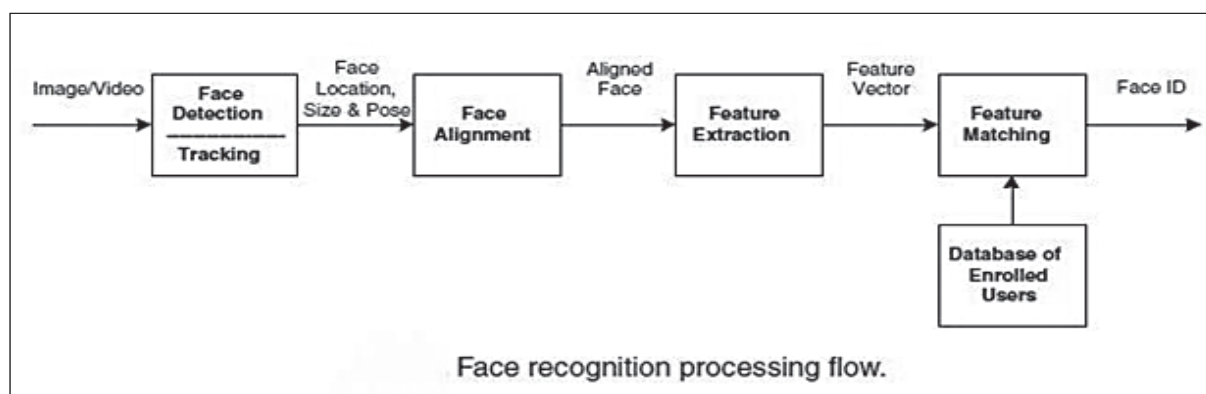


Рис. 1. Структура процесса распознавания лиц

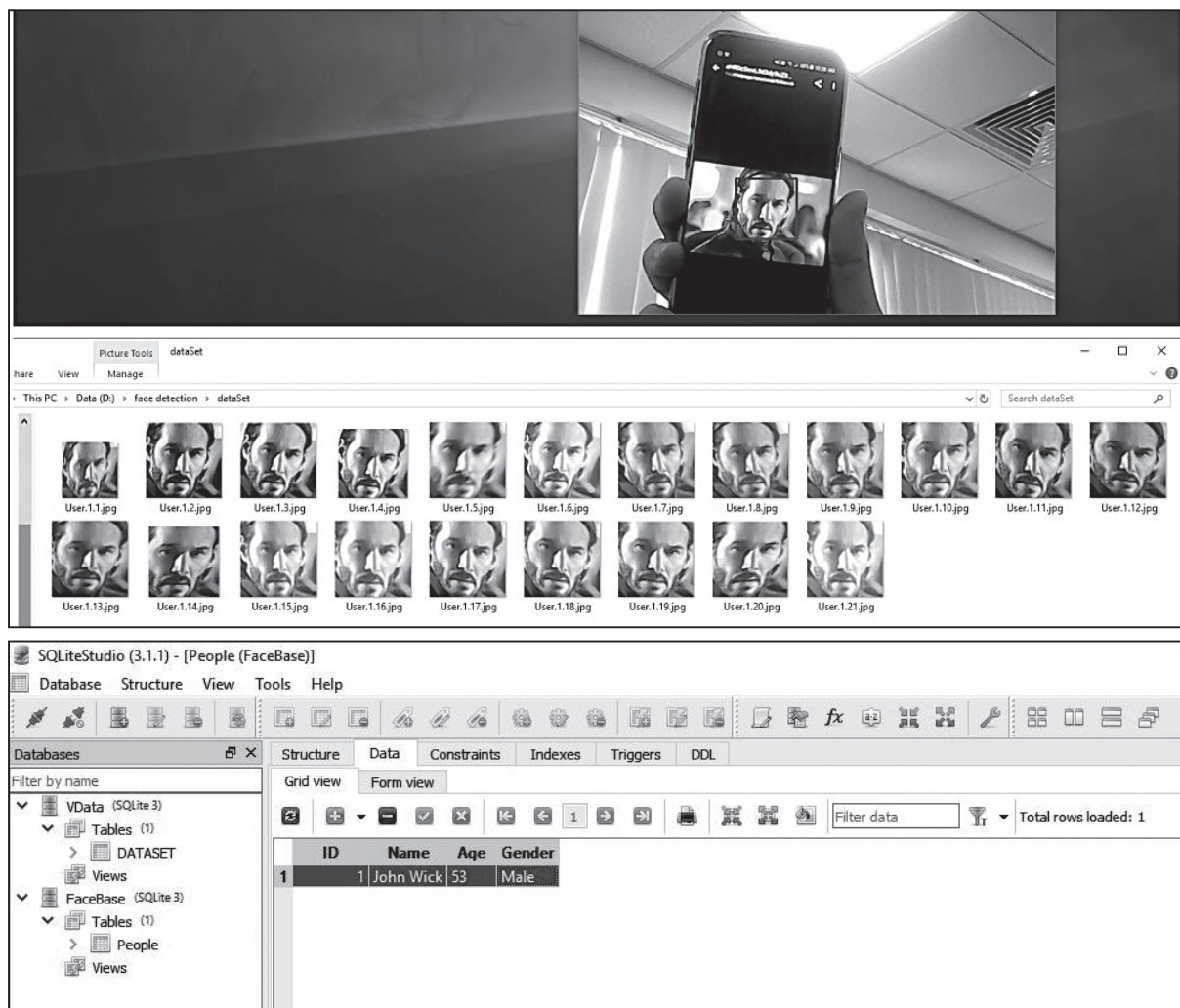


Рис. 2. Данные сохранены

как инкапсуляция, наследование и определяемые пользователем *ADT*. Хранение изображений в объектно-ориентированной базе данных обеспечивает их сравнение со сканированным лицом. Длительность сравнения зависит в прямой степени от емкости базы данных. Так, задача допуска ограниченного количества лиц на определенную территорию легко решается при ее минимальной емкости. При ее увеличении возрастает длительность процесса сравнения. Она значительна при миллионах и более хранимых образов. Для ее уменьшения в хранимых образах выделяют классы и подклассы. Сравнение проводят с учетом классификации сканируемого образа, используя предлагаемый алгоритм сканирования (рис. 4).

Примерные результаты их использования

При идентификации образа лица выполняется сравнение изображения со всеми

изображениями в базе данных. Это обеспечивает поиск в ней идентичного этому образу объекта (соотношение 1:N). Этот процесс включает сканирование изображения объекта, его запись/хранение и сравнение его с базой данных прообразов, чтобы идентифицировать этот объект.

Поскольку объект идентифицируется по его идентификатору (*OID = object Identifier*), системе хранения объектов необходим механизм для поиска объекта, заданного *OID*. Если *OID* являются логическими, то есть они не определяют местоположение объекта, система хранения должна поддерживать индекс, который сопоставляет *OID* с текущей позицией объекта.

Под классом подразумевается специальный тип данных, включающий в себя предварительно определенные свойства и методы. Это абстракция объекта. Объект создается,

когда он создается из класса. В отличие от обычных типов данных, класс является (абстрактной) единицей комбинации методов и свойств.

Каждый класс создан для выполнения определенной группы функций, специфичных для этого класса. Инкапсуляция позволяет скрыть информацию об объекте путем объединения информации и методов, связанных с информацией внутри объекта.

Покажем порядок разработки объектно-ориентированной базы данных для распознавания лиц. Считывание данных в объектно-ориентированной базе данных осуществляется следующим образом:

- объекты в объектно-ориентированной базе данных хранятся и связаны друг с другом через идентификаторы *ID*;
- объект может ссылаться на множество *ID* объектов, что означает, что отношения между объектами имеют общую форму $n: m$;
- ссылочные отношения между объектами устанавливаются объектно-ориентированной системой баз данных (рис. 3).

Когда дело доходит до определения и распознавания того, кто это лицо, нам нужно будет рассчитать *SAME / DIFFERENCE* между лицами, которые мы получаем. И говоря о *SAME / DIFFERENCE*, для простоты мы будем ссылаться на задачу «Рассчитать расстояние между векторами». Метод `findvectorIMG` – это модель, которая преобразует рамку лица

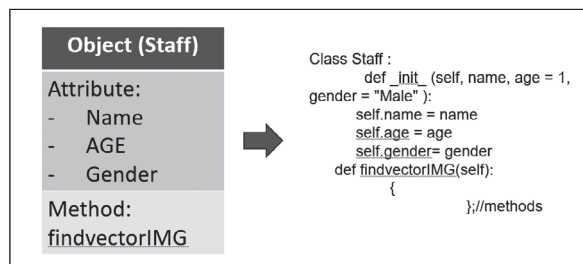


Рис. 3. Преобразование класса объектов в распознавании лиц

в вектор, поэтому, если две грани совпадают, два соответствующих вектора также должны быть близки друг к другу. Если присутствуют два изображения разных лиц, два соответствующих вектора также должны находиться дальше друг от друга. Этот алгоритм представляет собой сеть глубокого обучения КонвНет с трехсторонней структурой. Наша трио состоит из: 1 фотографии лица любого человека (*query*), 1 другой фотографии этого человека (*positive*), 1 фотографии другого человека (*negative*). Обучая такую модель, мы получим больше информации о взаимосвязи между изображениями, что делает нашу модель намного лучше подходящей для этой проблемы. Модель ConvNet включает изображение, которое будет размещено на трех разных дорожках, прежде чем соединиться, чтобы сформировать вектор с 4096 направления [7]. Этот вектор будет представлять фотографию, 4096 атрибутов можно рассматривать как 4096 характерных свойств этого объекта (рис. 4).

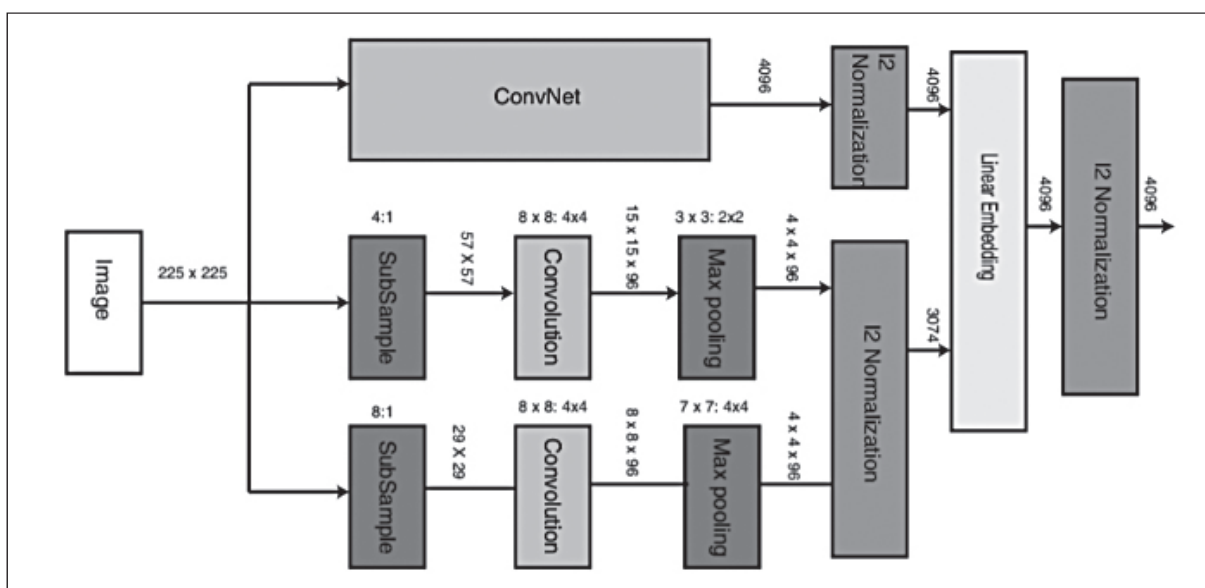


Рис. 4. Глубокое обучение ConvNet

После извлечения функции для данных изображения объекта мы получаем объектно-ориентированные данные. Таким образом, когда идентификатор лица представляет собой только сравнение двух соответствующих векторов двух лиц, чтобы можно было проверить личность сотрудника, соответствующая информация этого сотрудника инкапсулируется в объектно-ориентированные данные. Чтобы оптимизировать сравнение, создать векторные оптимизации, мы можем использовать функцию *LOSS* модели, описываемую выражением:

$$L(p_i, p_i^+, p_i^-) = \max \left\{ 0, g + D(f(p_i), f(p_i^+)) - D(f(p_i), f(p_i^-)) \right\},$$

где $f(p)$ – вектор представления p . D – расстояние между двумя векторами. Функция Loss будет равна $[-L]$. Модель будет работать так, чтобы верхняя функция достигла значения Max, что означает уменьшение расстояния между двумя векторами $f(p_i)$ (*Query Image*) и $f(p_i^+)$ (*Positive Image*). После многократного повторения этого шага для разных людей, нейронная сеть научится надежно создавать 4096 измерений для каждого человека. Любое другое изображение одного и того же человека даст аналогичное измерение. Тренировочный процесс КонвНет требует, чтобы

много данных занимало до 24 часов непрерывной тренировки для достижения высокой точности. У нас должен быть определенный набор данных, но здесь при моделировании системы используем 1 большой набор данных для тестирования. И здесь протестируем систему с пометкой Face in Wild (LFW). Этот набор данных включает в себя более 13000 изображений человеческого лица (помеченных), собранных в Интернете (LFW Dataset: Labeled Faces in the Wild) [8]. Откуда получаем результат сравнения векторизованных данных двух фотографий, снятых с камеры и в базе данных. Этот вектор будет представлять изображение, и когда модель хорошо обучена, эти 4096 атрибутов можно рассматривать как 4096 характерных атрибутов этого лица. Таким образом, модель выполнила задачу извлечения признаков, и благодаря функциям в этих объектно-ориентированных данных, можем сравнивать векторные данные [9].

Предложенный алгоритм должен обеспечивать создание классов, подклассов и каталогов образов по различным признакам, способным при сканировании лица в силу его индивидуальности отнести его в определенную нишу этой БД, в которой находятся образы с соответствующими аналогичными характеристиками особенностями (рис. 5). Это позволит организовать сравнение полученного при сканировании образа лица с образами не всей

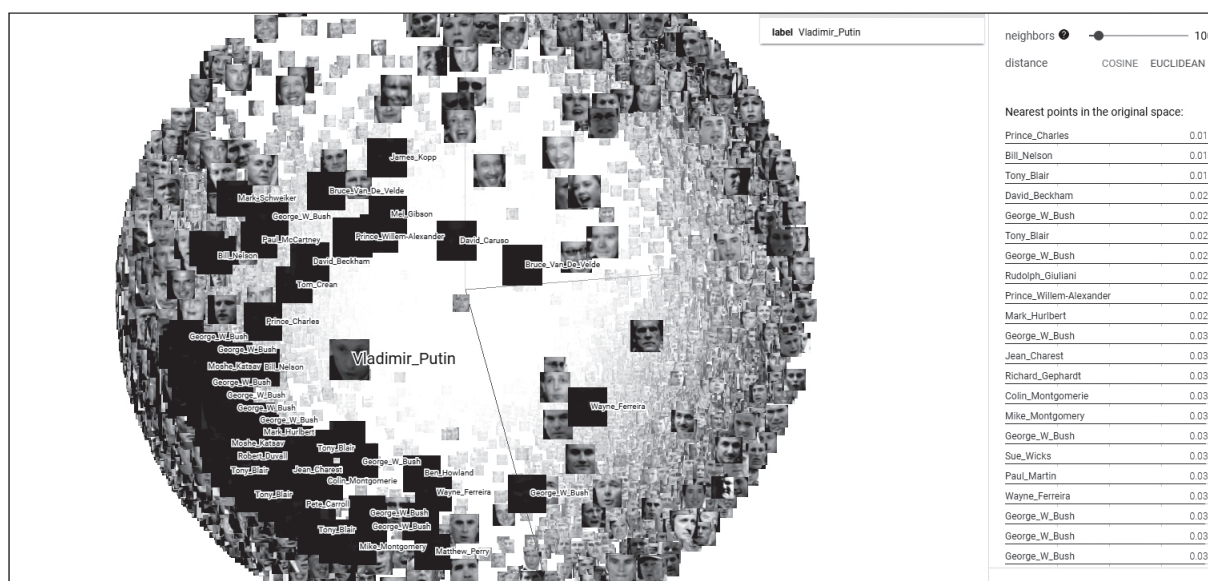


Рис. 5. Имитация результатов векторизованных данных (*Data Visualize*)

БД, а только с выделенным конечным подмножеством из общей генеральной совокупности образов БД. Естественно, во-первых, этот алгоритм сократит процесс сравнения сканированного лица с образами, хранимыми в БД, во-вторых, позволит определить местоположение этого отсканированного образа в соответствующем его индивидуальным особенностям месте их генеральной совокупности.

Часть данных объекта может быть сохранена с использованием файловых структур, описанных ранее, с некоторыми изменениями из-за неравномерного или большого размера этого объекта. Для реализации поля с несколькими элементами можно использовать связанные списки, поля, которые собирают элементы по В-дереву или по отдельным связям в базе данных. Агрегатные поля также могут быть исключены из уровня хранения путем нормализации. Очень большие объекты, которые трудно разобрать на более мелкие компоненты,

можно хранить в отдельном файле для каждого объекта [10].

Заключение

Управление данными с помощью системы баз данных принесет положительные преимущества, способствуя быстрому хранению, поиску, использованию и редактированию данных, обеспечивая эффективность системы распознавания лиц. Преимущество организации хранения и поиска образа лица в объектно-ориентированной базе лиц заключается в том, что этот алгоритм сократит процесс сравнения сканированного лица с образами, хранимыми в БД. Сохраненные форматы данных обеспечивают синхронизацию и поддерживают целостность данных. В то же время использование базы данных создаст много преимуществ в доступе к данным и их использовании для обслуживания системы распознавания лиц (рис. 6).



Рис. 6. Результаты использование объектно-ориентированных баз данных в распознавании лиц

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ существующих подходов к распознаванию лиц. – [Электронный ресурс]. – Код доступа: [http://paclub.ru / assets/curriculum/programs](http://paclub.ru/assets/curriculum/programs). – Дата доступа 14.01.2020.
2. Объектно-ориентированные базы данных – основные концепции, организация и управление: краткий обзор. – [Электронный ресурс]. – Код доступа: http://citforum.ru/database/articles/art_24.shtml. – Дата доступа 14.01.2020.
3. **Serge Abiteboul**. Towards a Deductive Object-Oriented Database Language // Data and Knowledge Eng. – 5. – 1990. – 263–287.
4. **Kyuchul Lee, Sukho Lee**. An Object-Oriented Approach to Data/Knowledge Modelling Based on Logic // 6th Int. Conf. Data Eng., Los Angeles, Calif., USA, Febr. 5–9, 1990. – 289–294.
5. **A. M. Alashqur, S. Y. W. Su, H. Lam**. A Rule-based Language for Deductive Object-Oriented Databases // 6th Int. Conf. Data Eng., Los Angeles, Calif., USA, Febr. 5–9, 1990. – 58–67.
6. **Lois M. L. Delcambre, Karen C. Davis**. Automatic Validation of Object-Oriented Database Structures // 5th Int. Conf. Data Eng., Los Angeles, Calif., USA, Febr. 6–10, 1989. – 2–9.
7. Introducing Convolutional Neural Networks in Deep Learning. – [Электронный ресурс]. – Код доступа: [https:// towardsdatascience.com/introducing-convolutional-neural-networks-in-deep-learning-400f9c3ad5e9](https://towardsdatascience.com/introducing-convolutional-neural-networks-in-deep-learning-400f9c3ad5e9). – Дата доступа 18.01.2020.

8. Labeled Faces in the Wild. – [Электронный ресурс]. – Код доступа: <http://vis-www.cs.umass.edu/lfw/>. – Дата доступа 18.01.2020.
9. A Detailed Guide to 7 Loss Functions for Machine Learning Algorithms with Python Code. – [Электронный ресурс]. – Код доступа: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2019/08/detailed-guide-7-loss-functions-machine-learning-python-code/>. – Дата доступа 18.01.2020.
10. Definition and Overview of ODBMS. – [Электронный ресурс]. – Код доступа: <https://www.geeksforgeeks.org/definition-and-overview-of-odbms/>. – Дата доступа 18.01.2020.

Поступила
29.01.2020

После доработки
18.03.2020

Принята к печати
01.06.2020

DONG X.C., IONIN V.S.

USING OBJECT-ORIENTED DATABASES IN FACE RECOGNITION

The aim of the work is to develop an algorithm functioning by a face recognition system using object-oriented databases. The system provides automatic identification of the desired object or identifies someone using a digital photo or video frame from a video source. The technology includes comparing pre-scanned face elements from the resulting image with prototypes of faces stored in the database. Modern packages of object-oriented databases give the user the opportunity to create a new class with the specified attributes and methods, obtain classes that inherit attributes and methods from super classes, create instances of the class, each of which has a unique object identifier, extract these instances one by one or in groups, and also download and perform these procedures. Using a convolutional neural network in the algorithm allows the transition from specific features of the image to more abstract details.

Keywords: face recognition, active appearance models, active form models, object-oriented database, communication between data, abstract data types, identifier.



Донг Суан Чинь – магистрант кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

E-mail: Chinhd12vt6@gmail.com

Dong Xuan Chinh – graduate student at the Department of Information and Computer Systems Design, Belarusian State University of Informatics and Radio electronics.



Ионин Виктор Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

E-mail: ionin@bsuir.by

Ionin Victor Sergeevich – candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Designing Information and Computer Systems of the Belarusian State University of Informatics and Radio electronics..

PRIHOZHYYA A.A.

SYNTHESIS OF PARALLEL ADDERS FROM IF-DECISION DIAGRAM

Belarusian National Technical University

Addition is one of the timing critical operations in most of modern processing units. For decades, extensive research has been done devoted to designing higher speed and less complex adder architectures, and to developing advanced adder implementation technologies. Decision diagrams are a promising approach to the efficient many-bit adder design. Since traditional binary decision diagrams does not match perfectly with the task of modelling adder architectures, other types of diagram were proposed. If-decision diagrams provide a parallel many-bit adder model with the time complexity of $O(\log_2 n)$ and area complexity of $O(n \times \log_2 n)$. The paper propose a technique, which produces adder diagrams with such properties by systematically cutting the diagram's longest paths. The if-diagram based adders are competitive to the known efficient Brent-Kung adder and its numerous modifications. We propose a blocked structure of the parallel if-diagram-based adders, and introduce an adder table representation, which is capable of systematic producing if-diagram of any bit-width. The representation supports an efficient mapping of the adder diagrams to VHDL-modules at structural and dataflow levels. The paper also shows how to perform the adder space exploration depending on the circuit fan-out. FPGA-based synthesis results and case-study comparisons of the if-diagram-based adders to the Brent-Kung and majority-invertor gate adders show that the new adder architecture leads to faster and smaller digital circuits.

Keywords: many-bit adders, decision diagrams, time delay, area, VHDL, FPGA, synthesis, adder space exploration.

Introduction

Arithmetic operations (addition, multiplication and others) are timing critical operations in almost all modern processing units [1–8]. The parameters such as implementation area, adder latency and power dissipation decide the choice of adders for different applications. There is an extensive research attention towards designing higher speed and less complex adder architectures with lower power dissipation. Many works have been devoted to adder architectures and implementation styles. Decision diagram based approaches [9–19] are a promising direction in the efficient adder design. The traditional binary decision diagrams have been extended to functional, biconditional, if-decision and other diagrams, which are more suitable for the adder design and optimization. This work develops an if-diagram based blocked architecture of parallel adders, estimates their time and area complexity, introduces a table method of constructing and VHDL-modelling, and provides a comparison of adders through results of FPGA-synthesis.

Adder design overview

Full adder. A one-bit full-adder adds three 1-bit numbers a , b and c_{in} , and produces two

1-bit numbers s and c_{out} (Figure 1). A full adder can be implemented by $s = a \oplus b \oplus c_{in}$ and $c_{out} = (a \wedge b) \vee (c_{in} \wedge (a \oplus b))$ where $\wedge$, $\vee$ and $\oplus$ are Boolean conjunction, disjunction and exclusive or respectively [1].

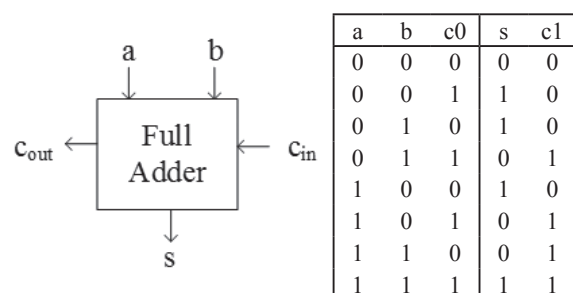


Fig. 1. One-bit full adder

Ripple-carry adder (RCA) adds two n -bit numbers $a = a_{n-1}, \dots, a_0$ and $b = b_{n-1}, \dots, b_0$, produces a $n+1$ -bit sum $s = s_n, \dots, s_0$, and consists of n full adders (one adder for one bit) (Figure 2). Each full adder inputs c_{in} , which is c_{out} of the previous full adder. RCA is relatively slow and is low-cost. RCA takes $O(n)$ of time for carry to reach the most significant bit, and requires $O(n)$ of cost for implementation.

Carry-lookahead adder (CLA) reduces the computation time against RCA [2]. For each bit

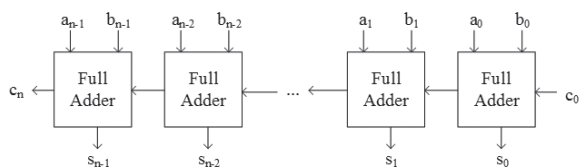


Fig. 2. N-bit ripple carry adder

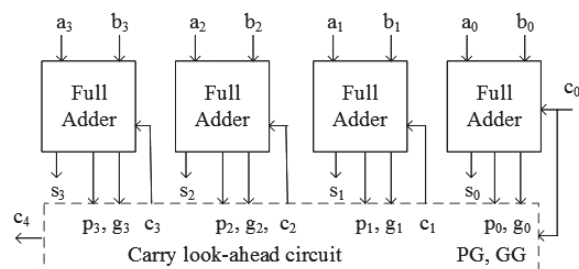


Fig. 3. Four-bit carry-lookahead adder

position, i , it creates two signals: a generation signal $g_i = a_i \wedge b_i$ and a propagation signal $p_i = a_i \oplus b_i$. Signal g_i sets output carry c_{i+1} to 1 regardless of input carry c_i . Signal p_i propagates carry from a less significant bit position.

Value 0 of both inputs kills carry in bit position i . The next-stage carry of CLA is $c_{i+1} = g_i \vee (p_i \wedge c_i)$. Figure 3 depicts a 4-bit CLA. The depth of CLA carry look-ahead circuit is significantly smaller against RCA. Several units of CLA provide the construction of a higher-level and wider-bit circuit.

Kogge–Stone adder (KSA) is a parallel prefix carry look-ahead adder [3]. KSA calculates the generalized propagation signal, P and generation signal, G recurrently in two cases: 1) given g_i and p_i , then $G = g_i$ and $P = p_i$; 2) given two pairs (G_i, P_i) and (G_j, P_j) , then pair $(G, P) = (G_i, P_i) \diamond (G_j, P_j)$ is a composition $\diamond$ of two pair inputs: $G = (P_i \wedge G_j) \vee G_i$ and $P = P_i \wedge P_j$. The carry and sum signals are $C_i = G_i$ and $S_i = P_i \oplus C_{i-1}$ respectively. Figure 4 depicts the carry part of 8-bit KSA (rectangle represents case 1, and circle represents case 2).

Brent–Kung adder (BKA) reduces against KSA the power consumption and chip area as well as increases the speed [4, 5]. BKA is much quicker than RCA. BKA defines a recurrent computation of (G_i, P_i) in two cases: 1) $(G_i, P_i) = (g_i, p_i)$ for $i = 0$; 2) $(G_i, P_i) = (g_i, p_i) \diamond (G_{i-1}, P_{i-1})$ for $i = 1, 2, \dots, n-1$. It can be seen that

$$(G_{n-1}, P_{n-1}) = (g_{n-1}, p_{n-1}) \diamond (g_{n-2}, p_{n-2}) \diamond \dots \diamond (g_0, p_0).$$

Brent and Kung proved that operator $\diamond$ is associative, therefore, (G_{n-1}, P_{n-1}) can be computed

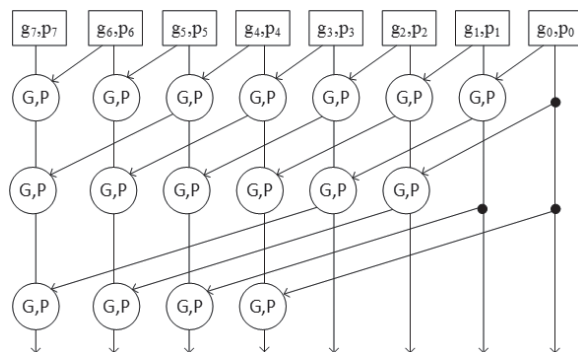


Fig. 4. Carry part of Kogge–Stone 8-bit adder

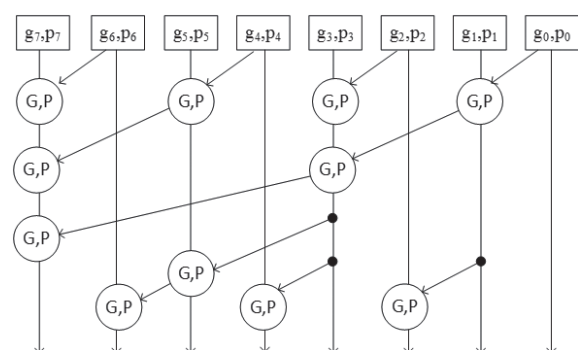


Fig. 5. Carry part of Brent–Kung 8-bit adder

in a tree-like manner. As a result, the addition of n -bit numbers consumes $O(\log_2 n)$ of time and consumes $O(n \times \log_2 n)$ of area. Figure 5 depicts the carry part of 8-bit BKA.

Majority-inverter gate adder (MIGA) exploits a representation of logic functions by a *majority-inverter* graph [6, 7]. MIGA consists of majority nodes and regular/complemented edges. A function $M3(x, y, z)$ expressed by $(x \wedge y) \vee (x \wedge z) \vee (y \wedge z)$ defines the node semantics. Figure 6 depicts a 1-bit full-adder consisting of three M3 nodes. The authors of [7] optimize MIGAs via a new Boolean algebra. The optimized MIGAs have smaller depth than the original and-inverter adders.

Pass Exclusive-Not-OR gate circuits. Work [8] introduces a new logic style for p-n junction based digital graphene circuits: a pass-XNOR compact energy efficient logic style. The pass-XNOR gate shows a higher expressive power compared to the CMOS counterparts as it requires a smaller number of devices to implement XNOR/XOR-dominated logic functions, in particular adders.

Decomposition of Boolean incompletely specified functions

Works [9, 10] originally propose the concept of if-decision diagram that is a result of the

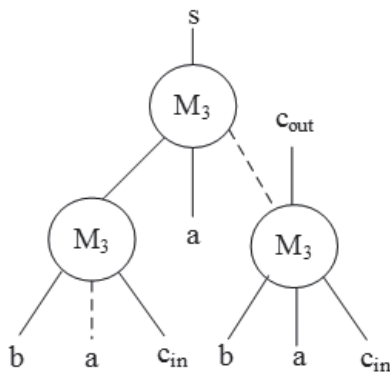


Fig. 6. Majority-invertor full-adder (dash line represents complementation)

theory of incompletely specified Boolean functions [11, 12]. Let $B = \{0, 1\}$ and $M = \{0, 1, dc\}$ where 0 and 1 are Boolean values and dc is a don't care value. An incompletely specified Boolean function $\varphi(x)$ of vector Boolean variable $x = (x_1, \dots, x_n)$ is a mapping $\varphi: B^n \rightarrow M$. In φ , value $dc \in M$ can be arbitrarily replaced with 0 or 1. Function $\varphi(x)$ can be represented by three sets: on-set $ON(\varphi)$ where $\varphi(x) = 1$, off-set $OFF(\varphi)$ where $\varphi(x) = 0$, and don't care set $DC(\varphi)$ where $\varphi(x) = dc$. Three Boolean characteristic functions describe the sets: $\varphi^{on}(x)$ takes value 1 if $x \in ON(\varphi)$ and value 0 otherwise; $\varphi^{off}(x)$ takes value 1 if $x \in OFF(\varphi)$ and value 0 otherwise; $\varphi^{dc}(x)$ takes value 1 if $x \in DC(\varphi)$ and value 0 otherwise. We call function $f(x) = \varphi^{on}(x)$ a value function, and call function $d(x) = \neg\varphi^{dc}(x)$ a domain function where $\neg$ is Boolean inversion. Pair $(f(x)|d(x))$ describes the incompletely specified function $\varphi(x)$.

In pair $(f(x)|d(x))$, we may replace $f(x)$ without changing $\varphi(x)$, by other function $v(x)$ of the slice

$$(f \wedge d)^{on} \subseteq v^{on} \subseteq (f \vee d)^{on}. \quad (1)$$

Since the functions of slice (1) can produce digital circuits of various time and area, we introduce an operation $v(x) = \min(f(x)|d(x))$ to select a best function of the slice [9 - 12]. The following theorem generalizes the widely known Shannon expansion. Let $\min(f|d)$ and $\min(f|\neg d)$ be residual functions (cofactors) of function f on function d .

Theorem. Expansion (2) holds for arbitrarily Boolean functions $f(x)$ and $d(x)$.

$$f = d \wedge \min(f|d) \vee \neg d \wedge \min(f|\neg d) \quad (2)$$

Expansion (2) is capable of efficiently solving many optimization problems of digital system design.

If-decision diagrams

The if-decision diagram (IFD) [9] represents expansion (2) by nodes of a directed acyclic-labeled graph. We use it for the modelling, synthesis and optimization of adders. Figure 7 depicts a nonterminal node. Its three child nodes are the if-node d , high-node $g = \min(f|d)$ and low-node $h = \min(f|\neg d)$, which form a node notation $ifd(d, g, h)$. A terminal node is either a constant 0, constant 1, variable x_i or its negation $\neg x_i$. IFD is a promising generalization of BDD [13].

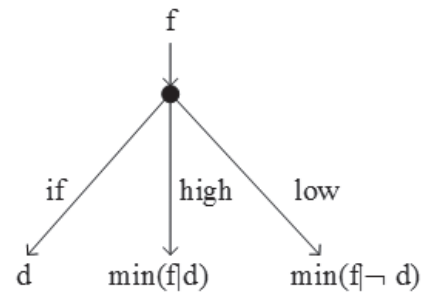


Fig. 7. Nonterminal node of if-decision diagram

Biconditional Binary Decision Diagrams (BBDD) are a special case of IFDs. Two ways are known to infer BBDD. According to work [11] (pages 197–201), if $d = x_i \oplus x_j$ then (2) looks like $f = (x_i \oplus x_j) \wedge f_{x_i=\neg x_j} \vee \neg(x_i \oplus x_j) \wedge f_{x_i=x_j}$, (3)

where $f_{x_i=\neg x_j}$ and $f_{x_i=x_j}$ are cofactors (or residual functions) produced by operations $\min(f|x_i \oplus x_j)$ and $\min(f|\neg(x_i \oplus x_j))$ respectively (pages 75–82).

Work [14] introduces BBDD through a biconditional expansion that is similar to expansion (3) and is a special case of the (x_i, p) -decomposition proposed in [15]. The authors provide a one-pass logic synthesis methodology and tool, which combines the logic optimization and technology mapping phases in a single step carried out through a common data structure. The Gemini tool [16] exploits the methodology to synthesize efficient pass-XNOR-gate-based circuits.

Modelling adders by if-decision diagrams

Works [17, 18] propose a method of modelling adders by IFDs. Figure 8 depicts a two-root IFD of 1-bit full adder. The diagram consists of three nonterminal *ifd*-nodes and seven terminal nodes.

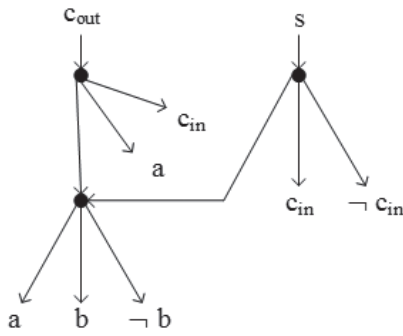


Fig. 8. Two-root IFD of 1-bit full adder

Many-root-IFD is a model for the construction of n -bit ripple carry adders (IFDRCA). Figure 9 depicts a 7-bit IFDRCA. While the advantage of the adder is the low cost (21 nonterminal ifd-nodes), its drawback is a big depth (8 nonterminal nodes).

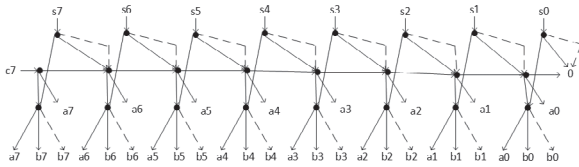


Fig. 9. IFD of 7-bit RCA (dash line is complementation)

From ripple carry to parallel IFD-based adders: transformation technique

In this section, we propose a technique of transforming an IFDRCA to an if-decision diagram based parallel adder (IFDPA) with reduced critical paths. The technique systematically cuts the critical paths of the diagram. We demonstrate the technique on the 7-bit IFDRCA, and in particular on the diagram of carry signal c_2 depicted in Figure 10 (the diagram size is 6 and the depth is 4 ifd-nodes).

Figure 11 (a) depicts a diagram of domain function d_2 that is capable of cutting the critical path in

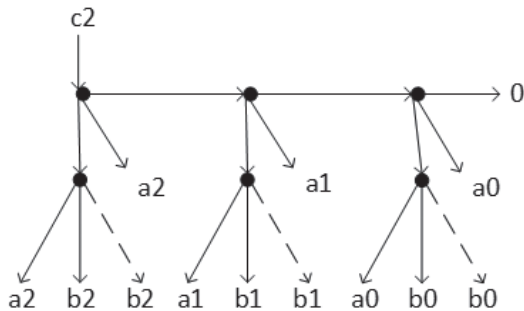
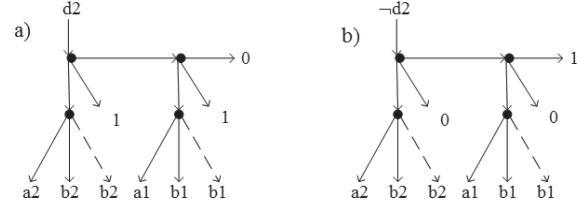
Fig. 10. IFD of carry signal c_2

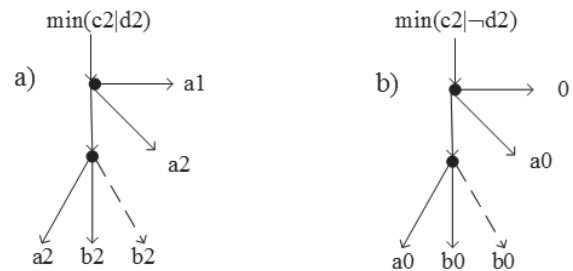
diagram c_2 . Figure 11 (b) depicts a diagram that represents an inversion of d_2 . It is obtained by applying the inversion operation $\neg$ to ifd-nodes: $\neg ifd(d, g, h)$ is functionally equivalent to $ifd(d, \neg g, \neg h)$.

Fig. 11. IFDs of domain functions d_2 and $\neg d_2$

To perform the minimization operation on the IFDs, we provide four reduction rules. Given diagram $f = ifd(e, g, h)$ representing the value function, the result of the minimization operation $\min(f|d)$ depends on the diagram that represents the domain function d :

1. If $d = ifd(e, u, 0)$ then $\min(f|d) = \min(g|u)$
2. If $d = ifd(e, 0, u)$ then $\min(f|d) = \min(h|u)$
3. If $d = ifd(e, 1, u)$ then $\min(f|d) = ifd(e, g, \min(h|u))$
4. If $d = ifd(e, u, 1)$ then $\min(f|d) = ifd(e, \min(g|u), h)$

Rules 1 and 3 reduce the result (Figure 12, (a)) of operation $\min(c_2|d_2)$. Rules 2 and 4 simplify the result (Figure 12, (b)) of operation $\min(c_2|\neg d_2)$. Assembling these two diagrams together with diagram d_2 and sharing ifd-nodes yield the integrated diagram depicted in Figure 13.

Fig. 12. Products of $\min(c_2|d_2)$ and $\min(c_2|\neg d_2)$

Observing two diagrams in Figures 10 and 13, we conclude that the second IFD consists of 7 nodes, one more than the first one, but the critical path of the second IFD is one node shorter (3 against 4).

Applying the transformation technique to each long path of the IFD yields a many-root parallel if-decision diagram of the whole adder. Figure 14 depicts an if-diagram of the carry

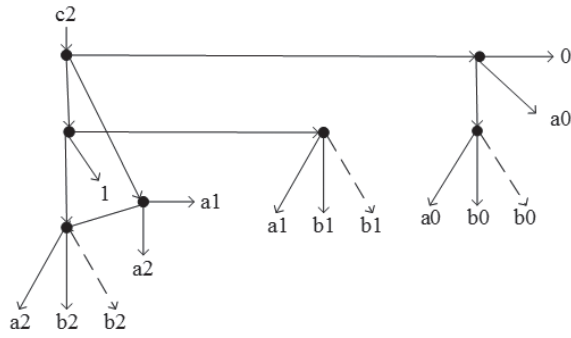


Fig. 13. IFD c_2 after assembling products and sharing nodes

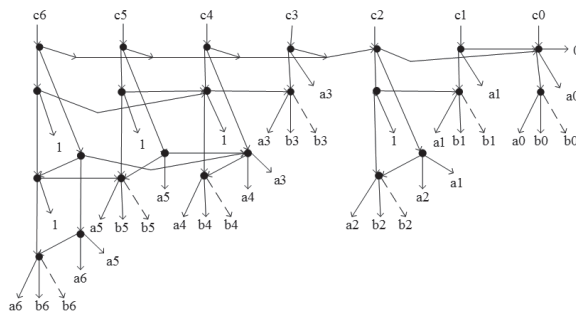


Fig. 14. Many-root IFD of carry part of 7-bit IFDPA

part of 7-bit IFDPA. Its overall size is 24 nodes (for comparison IFDRCA has 14 nodes), but its overall critical path is 4 nodes (IFDRCA has 8 nodes). Note, that the size and depth of the BDD-based adder [13] is much larger than those of IFDPA.

Blocked structure of IFDPA

The transformation technique is capable of producing an IFDPA for any n -bit width. All IFDPAs have the same structure. It consists of a chain of blocks (Figure 15); the bit-width of a block is twice larger than the width of the right-hand neighbor block. A scalar carry signal connects the neighbor blocks. The block widths from the right to the left are 1, 2, 4, 8, 16, 32 ... bit. The critical path (depth) of the blocks is 2, 3, 4, 5, 6, 7 ... node respectively. The largest number of nodes per bit in the blocks is 3, 5, 7, 9, 11, 13 ... respectively.

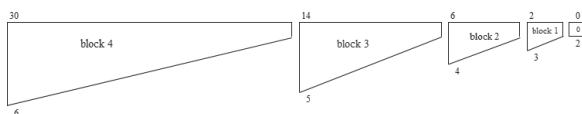


Fig. 15. Blocks of 31-bit IFDPA

Table representation of IFDPA

To represent the many-root IFDPA consisting of full blocks, we introduce a matrix $M[R \times C]$ of *ifd*-nodes, where $C = \text{width} + 1$ is the number of columns, and $R = 3 + 2 \times (\text{depth} - 2)$ is the number of rows. Figure 16 depicts matrix M of the 15-bit IFDPA constructed of four blocks k_0 , k_1 , k_2 and k_3 . It consists of cells describing *ifd*-nodes. Each cell includes three elements, which are arguments of function *ifd*. The argument can be a reference (edge) to other cell (the edge indicates other nonterminal node), constants 0 and 1, and variables a_i and b_i (these elements are associated with terminal nodes of IFD). Cell (0, 0) has a reference to cell (1, 1). Other cells are empty.

The matrix enumerates the columns from the left to the right by 0, ..., 15. Contrary, it enumerates adder bits (and associated variables) from the right to the left. The first row cells correspond to sum signals $s_0, \dots, s_{14}$, and the second row cells match carry signals $c_0, \dots, c_{14}$. All nonempty cells of a column describe nodes performing calculations on the corresponding bit. Specifier 'not' indicates the complement edge.

Estimation of IFDPA parameters

Work [19] provides efficient methods of computer (digital) system analysis. The size $S^{rc}(n)$ and depth $D^{rc}(n)$ of the n -bit IFDRCA (at $n = 1, 3, 7, 15, 31, \dots$) counted in the number of if-diagram nonterminal nodes can be estimated as

$$S^{rc}(n) = 3 \times n \quad (4)$$

$$D^{rc}(n) = n + 1 \quad (5)$$

The size $S^{pr}(n)$ and depth $D^{pr}(n)$ of the n -bit parallel adder is

$$S^{pr}(n) = n + (n + 1) \times \log_2(n + 1) \quad (6)$$

$$D^{pr}(n) = 1 + \log_2(n + 1) \quad (7)$$

Table 1 provides a comparison of IFDRCA against IFDPAs produced by means of transforming the if-diagrams. The diagram depth and size varies depending on the adder bit-width. The gain in the depth (measured in number of nodes) of IFDPAs over the depth of IFDRCA increases up to 93.1 times for 1023 bit-width. At the same time, IFDPAs' size is larger against IFDRCA up to 5.0x.

	c14	s14	s13	s12	k3				s9	s8	s7	s6	k2				s3	s2	k1		k0
	0	1	2	3	s11	s10	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15					
0	reference (1,1)	(8,1) (1,2) not(1,2)	(6,2) (1,3) not(1,3)	(6,3) (1,4) not(1,4)	(4,4) (1,5) not(1,5)	(6,5) (1,6) not(1,6)	(4,6) (1,7) not(1,7)	(4,7) (1,8) not(1,8)	(2,8) (1,9) not(1,9)	(6,9) (1,10) not(1,10)	(4,10) (1,11) not(1,11)	(4,11) (1,12) not(1,12)	(2,12) (1,13) not(1,13)	(4,13) (1,14) not(1,14)	(2,14) (1,15) not(1,15)	(2,15) 0 1					
1		(2,1) (3,1) (1,9)	(2,2) (3,2) (1,9)	(2,3) (3,3) (1,9)	(2,4) (3,4) (1,9)	(2,5) (3,5) (1,9)	(2,6) (3,6) (1,9)	(2,7) (3,7) (1,9)	(2,8) b7 (1,9)	(2,9) (3,9) (1,13)	(2,10) (3,10) (1,13)	(2,11) (3,11) (1,13)	(2,12) b3 (1,13)	(2,13) (3,13) (1,15)	(2,14) b1 (1,15)	(2,15) b0 0					
2		(4,1) 1 (2,5)	(4,2) 1 (2,5)	(4,3) 1 (2,5)	(4,4) 1 (2,5)	(4,5) 1 (2,7)	(4,6) 1 (2,7)	(4,7) 1 (2,8)	b7 a7 not a7	(4,9) 1 (2,11)	(4,10) 1 (2,11)	(4,11) 1 (2,12)	b3 a3 not a3	(4,13) 1 (2,14)	b1 a1 not a1	b0 a0 not a0					
3		(4,1) (5,1) (3,5)	(4,2) (5,2) (3,5)	(4,3) (5,3) (3,5)	(4,4) b11 (3,5)	(4,5) (5,5) (3,7)	(4,6) b9 (3,7)	(4,7) b8 b7		(4,9) (5,9) (3,11)	(4,10) b5 (3,11)	(4,11) b4 b3		(4,13) b2 b1							
4		(6,1) 1 (4,3)	(6,2) 1 (4,3)	(6,3) 1 (4,4)	b11 a11 not a11	(6,5) 1 (4,6)	b9 a9 not a9	b8 a8 not a8		(6,9) 1 (4,10)	b5 a5 not a5	b4 a4 not a4		b2 a2 not a2							
5		(6,1) (7,1) (5,3)	(6,2) b13 (5,3)	(6,3) b12 b11		(6,5) b10 b9				(6,9) b6 b5											
6		(8,1) 1 (6,2)	b13 a13 not a13	b12 a12 not a12		b10 a10 not a10				b6 a6 not a6											
7		(8,1) b14 b13																			
8		b14 not a14																			

Fig. 16. Matrix M representing 15-bit parallel adder (filled columns depict 4 blocks)

Table 1. Depth and size of IFDRCA and IFDPA carry part vs. adder bit-width

Blocks	Width, bit	IFDRCA		IFDPA		
		Depth	Size	Depth	Size	Fan-out
1	1	2	2	2	2	2
2	3	4	6	3	8	3
3	7	8	14	4	24	5
4	15	16	30	5	64	9
5	31	32	62	6	160	17
6	63	64	126	7	384	33
7	127	128	254	8	896	65
8	255	256	510	9	2048	129
9	511	512	1022	10	4608	257
10	1023	1024	2046	11	10240	513

Table 2. Depth and size of IFDPFA carry part vs. adder fan-out

fan-out	Bit-width							
	31		63		127		255	
	depth	size	depth	size	depth	size	depth	size
3	17	92	33	188	65	380	129	764
4	13	100	23	208	45	420	87	848
5	10	120	18	248	34	504	66	1016
6	9	120	16	246	28	504	54	1014
7	8	128	14	264	24	544	46	1096
8	8	130	12	280	22	570	40	1154
9	7	144	11	304	19	624	35	1264
10	7	140	11	294	18	608	32	1234
11	7	140	10	304	17	620	29	1264

Adder space exploration by means of fan-out

Observing the IFDPA shows that the block output carry signal has largest fan-out among other signals, which grows exponentially depending on the block index. Given a constraint, F on the fan-out of n -bit IFDPA, the subject is to reduce the adder depth and / or size, obtaining new fan-out constrained adder denoted IFDPFA. We build IFDPFA consisting of three parts: right, central and left. The central part includes several fan-out constrained blocks of width, $F-1$. The right and left parts includes blocks of the bit-width smaller than $F-1$. For instance, Figure 17 depicts a 7-bit

IFDPFA at $F = 3$, consisting of 3 central blocks of width 2 and of a right block of width 1. Its depth is 5, one node larger against the 7-bit IFDPA (Figure 14), but its size is 20, four nodes smaller. The IFDPA has the fan-out of 5.

By the assignment of various value to F , we can perform the exploration of adder space, thus obtaining appropriate values of the adder depth and size. Table 2 reports the depth and size of fan-out constrained adders of four bit-widths: 31, 63, 127 and 255. The weakening of fan-out constraint from 3 to 11 leads to the reduce of adder depth and to the growth of adder size.

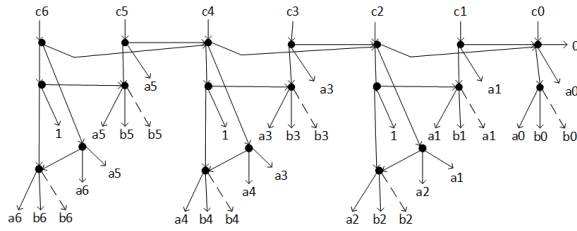


Fig. 17. Seven-bit IFDPFA; fan-in 3, depth is 5, and size is 20

VHDL modelling of if-diagram based adders

VHDL provides facilities for modeling adders at behavioral, dataflow and structural levels [20, 21]. Figure 18 depicts six types of cell concerning VHDL in the 15-bit IFDPA matrix M . As many as 29 cells correspond to XNOR-gate, 31 cells correspond to two-input multiplexer MUX , 17 cells correspond to OR-gate. We put into accordance a scalar signal $S_{c,r}$ to each non-empty cell, except the cells of row 0, which represent signals of sum S .

Figure 19 shows an example VHDL-model of a 3-bit IFDPA, which consists of two modules: entity *ADDER_3* and architecture *STRUCTURE_3*. The first module describes the adder input and output ports, while the second one describes the adder at the structure-dataflow level. All the signal types are from the package *std_logic_1164* of IEEE library. The architecture models the adder structure by component instantiation and signal

```
library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;
entity ADDER_3 is port(
  A: in std_logic_vector(2 downto 0);
  B: in std_logic_vector(2 downto 0);
  S: out std_logic_vector(3 downto 0));
end entity ADDER_3;
architecture STRUCTURE_3 of ADDER_3 is
  component MUX is port(
    SEL: in std_logic;
    D0: in std_logic;
    D1: in std_logic;
    RES: out std_logic);
  end component MUX;
  signal S0_1, S0_2: std_logic;
  signal S1_1, S1_2: std_logic;
  signal S2_1, S2_2, S2_3, S2_4: std_logic;
begin
  S(0) <= not S0_2;
  S0_1 <= S0_2 and B(0);
  S0_2 <= B(0) xnor A(0);
  S(1) <= S0_1 xnor S1_2;
  C10: MUX port map (S1_2, B(1), S0_1, S1_1);
  S1_2 <= B(1) xnor A(1);
  S(2) <= S1_1 xnor S2_4;
  C20: MUX port map (S2_2, S2_3, S0_1, S2_1);
  S2_2 <= S2_4 or S1_2;
  C21: MUX port map (S2_4, B(2), B(1), S2_3);
  S2_4 <= B(2) xnor A(2);
  S(3) <= S2_1;
end architecture STRUCTURE_3;
```

Fig. 19. VHDL model of 3-bit parallel adder

assignment statements, and by logic operators of VHDL. The adder architecture uses a component of two-input multiplexer MUX .

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	(1,1)	(8,1) (1,2) not(1,2)	(6,2) (1,3) not(1,3)	(6,3) (1,4) not(1,4)	(4,4) (1,5) not(1,5)	(6,5) (1,6) not(1,6)	(4,6) (1,7) not(1,7)	(4,7) (1,8) not(1,8)	(2,8) (1,9) not(1,9)	(6,9) (1,10) not(1,10)	(4,10) (1,11) not(1,11)	(4,11) (1,12) not(1,12)	(2,12) (1,13) not(1,13)	(4,13) (1,14) not(1,14)	(2,14) (1,15) not(1,15)	(2,15) 0 1
1		(2,1) (3,1) (1,9)	(2,2) (3,2) (1,9)	(2,3) (3,3) (1,9)	(2,4) (3,4) (1,9)	(2,5) (3,5) (1,9)	(2,6) (3,6) (1,9)	(2,7) (3,7) (1,9)	(2,8) (3,8) (1,9)	(2,9) (3,9) (1,13)	(2,10) (3,10) (1,13)	(2,11) (3,11) (1,13)	(2,12) (3,12) (1,13)	(2,13) (3,13) (1,15)	(2,14) (3,14) (1,15)	
2		(4,1) 1 (2,5)	(4,2) 1 (2,5)	(4,3) 1 (2,5)	(4,4) 1 (2,5)	(4,5) 1 (2,7)	(4,6) 1 (2,7)	(4,7) 1 (2,8)	b7 a7 not a7	(4,9) 1 (2,11)	(4,10) 1 (2,11)	(4,11) 1 (2,12)	b3 a3 not a3	(4,13) 1 (2,14)	b1 a1 not a1	b0 a0 not a0
3		(4,1) (5,1) (3,5)	(4,2) (5,2) (3,5)	(4,3) (5,3) (3,5)	(4,4) (5,4) (3,5)	(4,5) (5,5) (3,7)	(4,6) (5,6) (3,7)	(4,7) (5,7) (3,7)		(4,9) (5,9) (3,11)	(4,10) (5,10) (3,11)	(4,11) (5,11) (3,11)		(4,13) (5,13) (3,15)		
4		(6,1) 1 (4,3)	(6,2) 1 (4,3)	(6,3) 1 (4,4)	b11 a11 not a11	(6,5) 1 (4,6)	b9 a9 not a9	b8 a8 not a8		(6,9) 1 (4,10)	b5 a5 not a5	b4 a4 not a4				
5		(6,1) (7,1) (5,3)	(6,2) (7,2) (5,3)	(6,3) (7,3) (5,3)		(6,5) (7,5) (5,3)				(6,9) (7,9) (5,3)						
6		(8,1) 1 (6,2)	b13 a13 not a13	b12 a12 not a12		b10 a10 not a10				b6 a6 not a6						
7		(8,1) b14 b13														
8		b14 a14 not a14														

is XNOR
 is OR
 is AND
 is NOT
 is MUX
 is reference

Fig. 18. VHDL model primitives of 15-bit IFDPA

Results

Comparison of IFDPA against Brent-Kung and majority-invertor-gate adders. The 8-bit IFDPA (it is based on 7-bit adder depicted in Figure 14) has the depth of 5, fan-out of 4 and size of 32 MUXs that represent 16 XNOR, 4 OR and 12 true MUX gates. The adder consists of 4 blocks which width is 1, 2, 2 and 3 bit. The 3-bit block is a right-hand slice of a 4-bit block. The 8-bit BKA (Figure 5) has the depth of 6, fan-out of 4 and size of 16 XOR, 11 OR and 30 AND gates. The number of OR / AND gates in BKA is 41, while the number of OR / AND gates in IFDPA is $4 + 12 \times 3 = 40$. Therefore, IFDPA is preferable to BKA with respect to the depth and size. Moreover, IFDPA is a multi-root decision diagram, and many advanced diagram-based design algorithms are applicable to it.

Table 3 provides a comparison of IFDPAs to MIGAs. Everyone can see that the gain of IFDPAs is significant against MIGAs [6] regarding both the size and depth.

FPGA-based synthesis of adders. We have synthesized the IFDRCA and IFDPA VHDL models of bit-width 15, 31, 63 and 127 for FPGA (device EP4CE115F2918L Cyclone IV E) using the software Quartus Prime Version 18.0.0 Build 614 04/24/2018 SJ Lite Edition, copyright Intel Corporation [22]. Two optimization modes (aggressive performance-speed and aggressive area) have produced networks with distinct parameters: time delay and number of logic elements. Tables 4 and 5 report obtained results.

The gain of IFDPA over IFDRCA with respect to the time delay increases rapidly with the growth of bit-width from 15 to 127. At the same time, IFDRCA consumes slightly less area against IFDPA.

Conclusion

We have analyzed known implementation models of many-bit adders and have developed

Table 3. Comparison of IFDPA against MIG adders

Width, bit	IFDPA		Width, bit	Optimized MIG	
	Size	Depth		Size	Depth
31	191	6	32	610	12
63	447	7	64	1159	11
127	1023	8	128	14672	19
255	2303	9	256	7650	16

Table 4. Time delay (ns) of FPGA implementation of IFDRCA and IFDPA vs. adder bit-width

Adder	Adder width, bit			
	15	31	63	127
IFDRCA, speed	21.3	40.6	73.9	137.3
IFDRCA, area	23.7	41.6	77.4	172.8
IFDPA, speed	17.5	16.7	26.7	37.3
IFDPA, area	19.0	22.6	27.5	40.5

Table 5. Logic elements (area) in FPGA implementation of IFDRCA and IFDPA vs. adder bit-width

Adder	Adder width, bit			
	15	31	63	127
IFDRCA, speed	31	74	172	327
IFDRCA, area	29	61	125	253
IFDPA, speed	37	81	172	359
IFDPA, area	36	77	157	321

a technique of transforming (by cutting the longest paths) a ripple-carry adder to a parallel adder represented by if-decision diagrams. The new parallel adder has a blocked structure, the performance of $O(\log_2 n)$ and the area size of $O(n \times \log_2 n)$. We have proposed the table representation of decision diagram-based adder and a method of mapping the diagram to a VHDL-model. The FPGA-based synthesis results and the comparisons of the if-diagram-based adders to the Brent-Kung and majority-invertor gate adders show that the new adders lead to faster and smaller circuits.

REFERENCES

1. T.-K. Liu, K.R. Hohulin, L.-E. Shiau, S. Muroga. «Optimal One-Bit Full-Adders with Different Types of Gates». IEEE Transactions on Computers. Bell Laboratories: IEEE, 1974, C-23 (1): 63–70.
2. Rosenberger, G.B. «Simultaneous Carry Adder». U.S. Patent 2,966,305. (1960–12–27).
3. P.M. Kogge, H.S. Stone. «A Parallel Algorithm for the Efficient Solution of a General Class of Recurrence Equations». IEEE Transactions on Computers. 1973, C-22 (8): 786–793.
4. R.P. Brent, H. Te Kung. «A Regular Layout for Parallel Adders». IEEE Transactions on Computers. 1982, C-31, (3): 260–264.
5. N. Poornima, V.S. Kanchana Bhaaskaran. «Area Efficient Hybrid Parallel Prefix Adders». Procedia Materials Science 10 (2015), pp. 371–380.

6. **L. Amarú, P.-E. Gaillardon, G. De Micheli**, «Majority-Inverter Graph: A New Paradigm for Logic Optimization» IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, vol. 35, no. 5, pp. 806–819, May 2016.
7. **L. Amarú, P.-E. Gaillardon, A. Chattopadhyay, G. De Micheli**, «A Sound and Complete Axiomatization of Majority-n Logic» IEEE Transactions on Computers, vol. 65, no. 9, pp. 2889–2895, September 2016.
8. **V. Tenace, A. Calimera, E. Macii, M. Poncino**. «Pass-XNOR logic: A new logic style for P-N junction based graphene circuits». DATE, 2014, pp.1–4.
9. **Prihozhy, A.A.** If-Diagrams: Theory and Application / A.A. Prihozhy // Proc. 7th Int. Workshop PATMOS'97.– UCL, Belgium, 1997.– P. 369–378.
10. **Prihozhy, A.A.** Parallel Computing with If-Decision-Diagrams / A.A. Prihozhy, P.U. Brancevich // Proc. Int. Conference PARELEC'98.– Poland, Technical University of Bialystok.– 1998.– P. 179–184.
11. **Prihozhy A.A.** Incompletely Specified Logical Systems and Algorithms / A.A. Prihozhy / Minsk, Technical Literature.– 2013.– 343 c.
12. **Prihozhy A.A.** «Generalization of the Shannon Expansion for Incompletely Specified Functions: Theory and Application». System analysis and applied information science». 2013; (1–2): 6–11.
13. **C.Y. Lee**, Representation of Switching Circuits by Binary-Decision Programs, Bell Systems Technical Journal, 1959, Vol. 38, No 4, pp. 985–999.
14. **L. Amarú, P.-E. Gaillardon, G. De Micheli**. «Biconditional BDD: a novel canonical BDD for logic synthesis targeting XOR-rich circuits» in DATE'13, 2013, pp. 1014–1017.
15. **A. Bernasconi et al.**, «On decomposing Boolean functions via extended cofactoring» in DATE, 2009, pp. 1464–1469.
16. **V. Tenace, A. Calimera, E. Macii, M. Poncino**. One-pass logic synthesis for graphene-based Pass-XNOR logic circuits. DAC, 2015: 128:1–128:6.
17. **Prihozhy, A.A.** If-Decision Diagram Based Synthesis of Digital Circuits / A.A. Prihozhy // Proc. Int. Conf. «Information Technologies for Education, Science and Business».– Minsk, Belarus.– 1999.– P. 65–69.
18. **Prihozhy, A.A.** If-Decision Diagram Based Modeling and Synthesis of Incompletely Specified Digital Systems / A.A. Prihozhy, B. Becker // Electronics and communications, Electronics Design.– Kyiv.– 2005, pp. 103–108.
19. **Prihozhy, A.A.** Analysis, transformation and optimization for high performance parallel computing / A.A. Prihozhy // Minsk, BNTU.– 2019.– 229 p.
20. IEEE Standard VHDL Language Reference Manual. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.– 2000.– 299 p.
21. **Prihozhy, A.A.** High-Level Synthesis through Transforming VHDL Models / A.A. Prihozhy // Chapter in Book «System-on-Chip Methodologies and Design Languages».– Kluwer Academic Publishers.– 2001.– P. 135–146.
22. Quartus Prime Lite Edition [Electronic resource].– Access mode: <https://fpgasoftware.intel.com/?edition=lite>.– Date of access: 24.04.2020.

ЛИТЕРАТУРА

1. **T.-K. Liu, K. R. Hohulin, L.-E. Shiau, S. Muroga**. «Optimal One-Bit Full-Adders with Different Types of Gates». IEEE Transactions on Computers. Bell Laboratories: IEEE, 1974, C-23 (1): 63–70.
2. **Rosenberger, G. B.** «Simultaneous Carry Adder». U. S. Patent 2,966,305. (1960–12–27).
3. **P.M. Kogge, H. S. Stone**. «A Parallel Algorithm for the Efficient Solution of a General Class of Recurrence Equations». IEEE Transactions on Computers. 1973, C-22 (8): 786–793.
4. **R.P. Brent, H. Te Kung**, «A Regular Layout for Parallel Adders». IEEE Transactions on Computers. 1982, C-31, (3): 260–264.
5. **N. Poornima, V.S. Kanchana Bhaaskaran**. «Area Efficient Hybrid Parallel Prefix Adders». Procedia Materials Science 10 (2015), pp. 371–380.
6. **L. Amarú, P.-E. Gaillardon, G. De Micheli**, «Majority-Inverter Graph: A New Paradigm for Logic Optimization,» IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, vol. 35, no. 5, pp. 806–819, May 2016.
7. **L. Amarú, P.-E. Gaillardon, A. Chattopadhyay, G. De Micheli**, «A Sound and Complete Axiomatization of Majority-n Logic,» IEEE Transactions on Computers, vol. 65, no. 9, pp. 2889–2895, September 2016.
8. **V. Tenace, A. Calimera, E. Macii, M. Poncino**. «Pass-XNOR logic: A new logic style for P-N junction based graphene circuits». DATE, 2014, pp.1–4.
9. **Prihozhy, A.A.** If-Diagrams: Theory and Application / A.A. Prihozhy // Proc. 7th Int. Workshop PATMOS'97.– UCL, Belgium, 1997.– P. 369–378.
10. **Prihozhy, A.A.** Parallel Computing with If-Decision-Diagrams / A.A. Prihozhy, P.U. Brancevich // Proc. Int. Conference PARELEC'98.– Poland, Technical University of Bialystok.– 1998.– P. 179–184.
11. **Прихожий А.А.** Частично определенные логические системы и алгоритмы / А.А. Прихожий / Минск, БНТУ.– 2013.– 343 с.
12. **Прихожий, А.А.** Обобщение разложения Шеннона для частично определенных функций: теория и применение / А.А. Прихожий / Системный анализ и прикладная информатика.– 2013, № 1–2.– С. 6–11.
13. **C.Y. Lee**, Representation of Switching Circuits by Binary-Decision Programs, Bell Systems Technical Journal, 1959, Vol. 38, No 4, pp. 985–999.
14. **L. Amarú, P.-E. Gaillardon, G. De Micheli**. «Biconditional BDD: a novel canonical BDD for logic synthesis targeting XOR-rich circuits,» in DATE'13, 2013, pp. 1014–1017.
15. **A. Bernasconi et al.**, «On decomposing Boolean functions via extended cofactoring,» in DATE, 2009, pp. 1464–1469.

16. V. Tenace, A. Calimera, E. Macii, M. Poncino. One-pass logic synthesis for graphene-based Pass-XNOR logic circuits. DAC, 2015: 128:1–128:6.
17. Prihozhy, A.A. If-Decision Diagram Based Synthesis of Digital Circuits / A.A. Prihozhy // Proc. Int. Conf. «Information Technologies for Education, Science and Business». – Minsk, Belarus. – 1999. – P. 65–69.
18. Prihozhy, A.A. If-Decision Diagram Based Modeling and Synthesis of Incompletely Specified Digital Systems / A.A. Prihozhy, B. Becker // Electronics and communications, Electronics Design. – Kyiv. – 2005, pp. 103–108.
19. Prihozhy, A.A. Analysis, transformation and optimization for high performance parallel computing / A.A. Prihozhy // Minsk, BNTU. – 2019. – 229 p.
20. IEEE Standard VHDL Language Reference Manual. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. – 2000. – 299 p.
21. Prihozhy, A.A. High-Level Synthesis through Transforming VHDL Models / A.A. Prihozhy // Chapter in Book «System-on-Chip Methodologies and Design Languages». – Kluwer Academic Publishers. – 2001. – P. 135–146.
22. Quartus Prime Lite Edition [Electronic resource]. – Access mode: <https://fpgasoftware.intel.com/?edition=lite>. – Date of access: 24.04.2020.

Поступила
11.04.2020

После доработки
01.05.2020

Принята к печати
01.06.2020

ПРИХОЖИЙ А. А.

СИНТЕЗ ПАРАМЕЛЬНЫХ СУММАТОРОВ ПО IF-ДИАГРАММАМ РЕШЕНИЙ

Сложение является одной из критичных ко времени операций в большинстве современных процессоров. В течение десятилетий проводились обширные исследования, посвященные проектированию высокоскоростных и менее сложных архитектур сумматоров, а также разработке передовых технологий реализации сумматоров. Диаграммы решений являются перспективным подходом к эффективному проектированию многоразрядных сумматоров. Поскольку традиционные двоичные диаграммы решений не полностью соответствуют задаче моделирования архитектур сумматоров, были предложены другие типы диаграмм. If-диаграммы решений являются параллельной моделью многоразрядного сумматора с временной сложностью $O(\log_2 n)$ и технической сложностью $O(n \times \log_2 n)$. Настоящая статья предлагает метод систематического разрезания длинных путей в графе диаграммы, который порождает модели сумматоров с такими характеристиками. Сумматоры на базе if-диаграмм конкурентоспособны по сравнению с сумматором Брент-Кунга и его многочисленными модификациями. Мы предлагаем блочную структуру параллельных сумматоров, построенных на if-диаграммах, и вводим их табличное представление, которое способно систематически создавать модели на основе диаграмм любой битовой ширины. Табличное представление сумматоров поддерживает эффективное отображение диаграмм в VHDL-модули на структурном и потоковом уровнях. В статье также исследовано пространство сумматоров посредством изменения коэффициента разветвления выходов. Результаты синтеза на основе ПЛИС и сравнения конкретных сумматоров, построенных на if-диаграммах, с сумматорами Брента-Кунга и мажоритарно-инверторными сумматорами показывают, что новые сумматоры дают более быстрые цифровые схемы меньшего размера.

Ключевые слова: много-битовые сумматоры, диаграммы решений, временная задержка, площадь, VHDL, FPGA, пространство распараллеливания



Anatoly Prihozhy is a full professor at the Computer and system software department of Belarusian national technical university, doctor of science (1999) and full professor (2001). His research interests include programming and hardware description languages, parallelizing compilers, and computer aided design techniques and tools for software and hardware at logic, high and system levels, and for incompletely specified logical systems. He has over 300 publications in Eastern and Western Europe, USA and Canada. Such worldwide publishers as IEEE, Springer, Kluwer Academic Publishers, World Scientific and others have published his works.

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

INFORMATION SECURITY

А. В. СИДОРЕНКО, И. В. ШАКИНКО

ЦИФРОВЫЕ ВОДЯНЫЕ ЗНАКИ, ФОРМИРУЕМЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСКРЕТНЫХ ХАОТИЧЕСКИХ ОТОБРАЖЕНИЙ

Белорусский государственный университет

Рассматривается алгоритм формирования, встраивания и извлечения цифровых водяных знаков (ЦВЗ) с использованием дискретных хаотических отображений, позволяющий выявлять модифицированные фрагменты изображения. Ключевой особенностью разработанного алгоритма является формирование ЦВЗ с использованием дискретных хаотических отображений и восстановление данного ЦВЗ после передачи изображения по каналу связи. Это, в свою очередь, оказывается возможным благодаря применению разработанного нами подхода, который осуществляет поиск начальных значений переменных дискретных хаотических отображений, использованных при формировании ЦВЗ. В данной работе встраивание ЦВЗ осуществляется одновременно в частотную и пространственную области изображения. Выявление модифицированных фрагментов изображения осуществляется на основе сравнения восстановленного и извлеченного ЦВЗ. Изображение разбивается на прямоугольные фрагменты заданного размера. Для каждого фрагмента определяется количество элементов восстановленного ЦВЗ, значения которых отличаются от значений соответствующих элементов извлеченного ЦВЗ. Если отношение данной величины к общему количеству элементов ЦВЗ, принадлежащих фрагменту, превышает выбранное пороговое значение, то делается вывод, что рассматриваемый фрагмент изображения был подвергнут модификации. Приводятся результаты тестирования разработанного алгоритма. Установлено, что наличие ЦВЗ в пространственной области позволяет выявить фрагменты изображения, которые были подвергнуты модификации в процессе передачи изображения. Наличие ЦВЗ в частотной области делает предлагаемый алгоритм стойким при преобразовании изображения к формату JPEG. Одновременное присутствие ЦВЗ в пространственной и частотной областях позволяет сочетать положительные качества каждого из рассмотренных подходов. При использовании ЦВЗ в пространственной и частотной областях предлагаемый алгоритм в рассмотренных тестах установил факт присутствия ЦВЗ в изображении. Таким образом, предлагаемый алгоритм может применяться при решении реальных задач защиты цифровых изображений в каналах передачи информации.

Ключевые слова: *изображение, информационная безопасность, хаотическое отображение, цифровой водяной знак, JPEG.*

Введение

Цифровые изображения являются неотъемлемой частью современных информационных технологий. Поскольку не все средства коммуникации позволяют обеспечить требуемый уровень безопасности [1], одним из приоритетных направлений в данной области является защита изображений в процессе их передачи по каналам связи. При этом одной из задач является выявление областей изображения, подвергнувшихся модификации. Для этого традиционно используются цифровые водяные знаки (ЦВЗ) [3]. Однако в канале связи изображения могут быть искажены вследствие присутствия шума. Искажение изображений возможно при преобразовании в другие графические форматы представления данных. Это приводит к неработоспособности существующих алгоритмов работы с ЦВЗ.

Возникает необходимость в разработке новых подходов и создании алгоритмов формирования, встраивания и извлечения ЦВЗ, позволяющих выявлять модифицированные фрагменты изображения при наличии шума в канале связи и учитывающие возможность преобразования изображения между различными графическими форматами.

Ключевой особенностью разработанного алгоритма является формирование ЦВЗ с использованием дискретных хаотических отображений и восстановление данного ЦВЗ после передачи изображения по каналу связи. Это, в свою очередь, оказывается возможным благодаря применению разработанного нами подхода, осуществляющего поиск начальных значений переменных дискретных хаотических отображений, которые использовались при формировании ЦВЗ.

Алгоритм формирования, встраивания и извлечения цифровых водяных знаков для изображений

Предлагаемый алгоритм включает в себя следующие основные этапы

1. Формирование последовательностей W_i и W_f . Последовательность W_i представляет собой ЦВЗ, предназначенный для встраивания в пространственную область изображения, а W_f – в частотную область. Количество элементов в данных последовательностях N и $N/64$, соответственно, N – количество пикселей в исходном изображении. Формирование W_i и W_f осуществляется аналогичным образом, поэтому рассмотрим данный процесс на примере последовательности W_i .

1.1. Выбор начального значения $x_{i,0}$. Выбор начальных значений осуществляется произвольным образом. Например, данные значения могут быть получены с использованием генераторов случайных чисел или сформированы на основе хеш-значения изображения.

1.2. Формирование последовательности целых чисел V_i . Формирование осуществляется с использованием одномерного дискретного хаотического отображения $f_{ch}(x)$:

$$x_{i+1} = f_{ch}(x_i) \quad (1)$$

где x_i – значение переменной отображения на i -ой итерации.

1.3. Преобразование последовательности V_i в последовательность W_i . Каждому элементу $v_{t,i}$ последовательности V_i ставится в соответствие строка b_i , состоящая из восьми символов и представляющая собой запись значения элемента $v_{t,i}$ в двоичной системе счисления. Элементам $w_{t,8i-7}, w_{t,8i-6}, \dots, w_{t,8i}$ последовательности W_i присваиваются значения, соответствующие символам строки b_i , $i = 1, 2, \dots, N$.

1.4. Перестановка элементов последовательности W_i . На основе начального значения $x_{p,0}$ с использованием хаотического отображения $f_{ch}(x)$ вычисляются значения $x_{p,i}$, $i = 1, 2, \dots, N$. Значение $x_{p,0}$ выбирается аналогичным образом, как и значение $x_{t,0}$. Однако стоит отметить, что в отличие от $x_{t,0}$, значение $x_{p,0}$ должно быть известно получателю изображения, содержащего ЦВЗ. На основе $x_{p,i}$ определяются значения u_i :

$$u_i = \text{floor}\left(\frac{x_{p,i} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot N\right) + 1 \quad (2)$$

После этого производится обмен значениями i -го и u_i -го элементов последовательности W_i , $i = 1, 2, \dots, N$. В данной работе осуществляется несколько перестановок подряд.

2. Использование двумерного дискретного косинусного преобразования (ДКП). Осуществляется разбиение изображения на блоки D_k размером 8 на 8 пикселей, $k = 1, 2, \dots, N/64$. К каждому блоку D_k применяется двумерное ДКП. Осуществляется квантование полученных коэффициентов. Данный процесс и используемые матрицы квантования подробно рассмотрены в работе [5]. Стоит отметить, что для совместимости с графическим форматом JPEG, ДКП применяется к изображению, представленному в цветовом пространстве YCbCr [6].

3. Формирование массива замены S . Массив S состоит из 128 элементов. Первым 64 элементам массива присваивается значение «1», остальным – «0». После этого осуществляется перестановка элементов данного массива. Перестановка осуществляется аналогичным образом, как на этапе 1.

4. Модификация коэффициентов ДКП. Модификация выбранных коэффициентов, полученных в результате применения двумерного ДКП, производится согласно выражению

$$D'_{k,1,1} = Wf_k \oplus S\left[\frac{D_{k,1,1} - (D_{k,1,1} \bmod 2)}{2} \bmod 128\right] \quad (3)$$

где $S[i]$ – значение i -го элемента массива S , $k = 1, 2, \dots, N/64$; $\oplus$ – сложение по модулю 2;

$a \bmod b$ – остаток от деления числа a на b ;

5. Использование обратного двумерного ДКП. Сначала осуществляется домножение коэффициентов ДКП на значения, содержащиеся в матрице квантования [5], после чего к каждому блоку изображения D'_k применяется обратное двумерное ДКП.

6. Модификация пикселей изображения. Модификация осуществляется следующим образом:

$$I'_j = I_j \oplus w_{t,j} \oplus S[(I_j - (I_j \bmod 2)) / 2] \quad (4)$$

где $\oplus$ – сложение по модулю 2;

I'_j – модифицированное значение j -го элемента изображения, $j = 1, \dots, N$;

$a \bmod b$ – остаток от деления числа a на b .

В результате выполнения данных операций получаем изображение, содержащее ЦВЗ в частотной и пространственной областях.

После этого осуществляется передача полученного изображения по каналу связи. Далее следует описание этапов алгоритма, выполнение которых производится на приемной стороне.

7. Формирование массива замены S . Данный этап аналогичен этапу 3 рассматриваемого алгоритма.

8. Извлечение ЦВЗ W_t из пространственной области изображения. Извлечение осуществляется согласно следующему выражению

$$w_{t,j} = (I'_j \bmod 2) \oplus S[(I'_j - (I'_j \bmod 2)) / 2] \quad (5)$$

9. Применение двумерного ДКП. Данный этап аналогичен этапу 4 рассматриваемого алгоритма.

10. Извлечение ЦВЗ W_f из частотной области изображения:

$$w_{f,k} = D_{k,1,1} \oplus S\left[\frac{D_{k,1,1} - (D_{k,1,1} \bmod 2)}{2} \bmod 128\right] \quad (6)$$

Последующие этапы алгоритма осуществляются аналогичным образом для последовательностей W_t и W_f поэтому рассмотрим данные этапы на примере последовательности W_t .

11. Обратная перестановка W_t . Перестановка на данном этапе является обратной к осуществляемой на этапе 1 рассматриваемого алгоритма.

12. Преобразование последовательности W_t в последовательность V_t . Данное преобразование выполняется следующим образом:

$$v_{t,i} = \sum_{j=0}^7 (2^j \cdot w_{t,8i-j}) \quad (7)$$

13. Формирование восстановленного ЦВЗ W'_t . Формирование осуществляется таким же образом, как и на этапе 1. В качестве начального значения используется значение x_0 , полученное на предыдущем этапе.

14. Проверка на присутствие ЦВЗ в изображении. Если отношение q количества различающихся элементов между извлеченным W и восстановленным W' ЦВЗ к общему количеству элементов ЦВЗ больше порогового значения q_{th} , то делается вывод о том, что изображение не содержит ЦВЗ.

Для выявления модифицированных областей изображения предлагается следующий подход. Прямоугольное окно размерами p_1 на p_2 последовательно перемещается в горизонтальном и вертикальном направлениях по всему изображению. Как и в случае проверки на

присутствие ЦВЗ, область изображения, принадлежащая окну, считается модифицированной, если значение q , полученное для данной области, больше порогового значения q_{th} .

Тестирование предлагаемого алгоритма

Тестирование предлагаемого алгоритма на стойкость осуществлялось при: а) преобразовании изображения к графическому формату JPEG и б) добавлении к изображению шума. При тестировании в качестве хаотического отображения использовалось логистическое. Значение параметра λ было выбрано равным 3.9995871. Размеры окна для выявления модифицированных областей менялись от 2 на 2 до 8 на 8 пикселя. В данной работе пороговое значение q_{th} , с использованием которого устанавливается факт присутствия ЦВЗ в изображении, было выбрано равным 0.4. Для выявления модифицированных областей использовались значения порогового значения q_{th} , равные 0.1, 0.2 и 0.25.

В качестве тестового использовались изображения «house.bmp» и «sailboat.bmp», представленные на рис. 1. Также были созданы их модифицированные копии (рису. 1, в) и 1, г).

При преобразовании изображений из графического формата BMP к графическому формату JPEG использование ЦВЗ в пространственной области не позволило установить факт присутствия ЦВЗ в изображении. При использовании ЦВЗ в частотной области факт присутствия ЦВЗ в изображении был установлен. При этом алгоритм оказался способным выделить все модифицированные области (отмечены красным цветом на рис. 2, а). Стоит отметить, что в данном случае один исходный фрагмент изображения «house.bmp» был классифицирован как модифицированный (фрагмент ствола дерева в левой части изображения).

Далее была рассмотрена работоспособность алгоритма при наличии шума в канале связи. Для этого у выбранного количества пикселей изображения случайным образом были изменены значения (искажению подвергались до 14% значений пикселей). Результаты обработки изображения разработанным алгоритмом представлены на рис. 2, б.

При использовании ЦВЗ в пространственной области разработанный алгоритм позволил выявить все модифицированные фрагменты

изображения (на рис. 2, б отмечены синим цветом). При этом следует учитывать, что выбор размера окна поиска модифицированных фрагментов в данной ситуации является существенным. При слишком малых значениях размера окна алгоритм срабатывает на единичные изменения значений пикселей, а при слишком большом – теряется точность в определении измененных фрагментов. На рис. 2, б приводятся результаты, полученные для размеров окна равных 8 на 8 пикселя и значении параметра qD_{th} равного 0.25. Стоит отметить, что при добавлении шума к изображению предлагаемый алгоритм не выявил присутствие ЦВЗ в частотной области изображения.

Заключение

В данной работе предложен алгоритм формирования, встраивания и извлечения ЦВЗ с использованием хаотических отображений.

Проведено тестирование предлагаемого алгоритма. Установлено, что наличие ЦВЗ

в пространственной области позволяет выявить фрагменты изображения, которые были подвергнуты модификации при передаче изображения. Наличие ЦВЗ в частотной области делает предлагаемый алгоритм стойким при преобразовании изображения к формату JPEG. Одновременное присутствие ЦВЗ в пространственной и частотной областях позволяет сочетать положительные качества каждого из рассмотренных подходов. При использовании ЦВЗ в пространственной и частотной областях предлагаемый алгоритм во всех рассмотренных тестах установил факт присутствия ЦВЗ в изображении.

Установлено, что разработанный алгоритм является работоспособным при искажении шумом до 14% значений элементов изображения.

Таким образом, предлагаемый алгоритм может использоваться при решении реальных задач защиты цифровых изображений в каналах передачи информации.

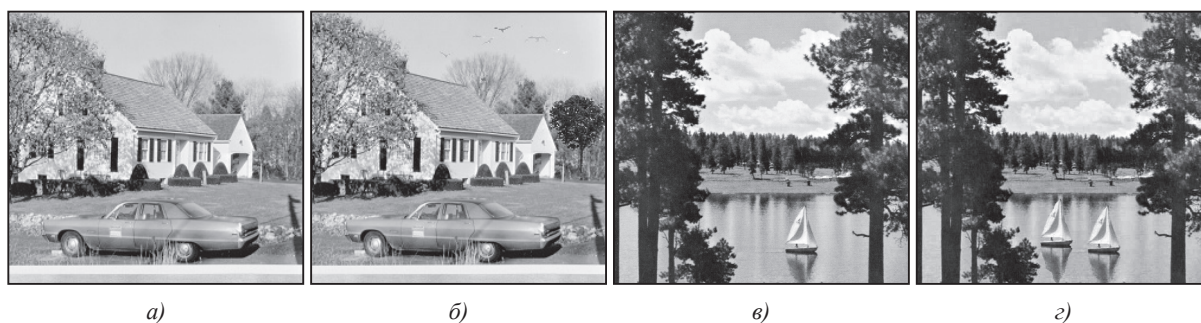


Рис. 1. Тестовые изображения «house.bmp» (а) и «sailboat.bmp» (б) и их модификации (в, г)

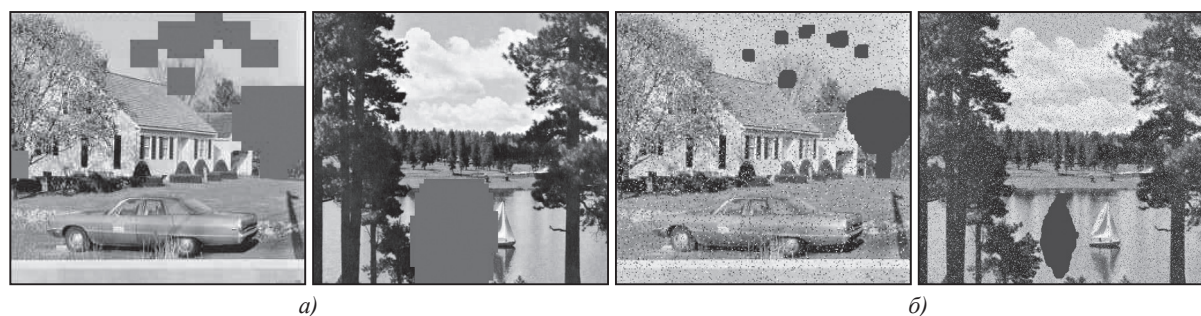


Рис. 2. Результат работы алгоритма при преобразовании графического формата изображения (а) и наличии шума в канале связи (б).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Tao, H.** Robust Image Watermarking Theories and Techniques: A Review / H. Tao [et al.] // Journal of Applied Research and Technology. – 2014. – Vol. 12. – P. 122–138
2. **Lin, S.D.** Improving the robustness of DCT-based image watermarking against JPEG compression / S.D. Lin, S-C Shie, J.Y. Guo // Computer Standards & Interfaces – 2009. – Vol. 32. – P. 54–60.
3. **Конахович, Г. Ф.,** Компьютерная стеганография. Теория и практика. / Г. Ф. Конахович, А. Ю. Пузыренко – К.: МК-Пресс, 2006. – 288с

4. **Савчина, Е. И.** Встраивание цифровых водяных знаков в частотную и пространственную области изображения / Е. И. Савчина // Вестник СибГАУ – 2016. Т. 17. – № 3. – С. 631–637.
5. **Acharya, T.** Image Processing: Principles and Applications / T. Acharya, A. K. Ray. – Hoboken: John Wiley and Sons, 2005. – С. 361
6. Information technology – Digital compression and coding of continuous-tone still images: JPEG File Interchange Format (JFIF) (Rec. ITU-T T.871 (05/2011))

REFERENCES

1. **Tao, H.** Robust Image Watermarking Theories and Techniques: A Review / H. Tao [et al.] // Journal of Applied Research and Technology. – 2014. – Vol. 12. – P. 122–138
2. **Lin, S. D.** Improving the robustness of DCT-based image watermarking against JPEG compression / S. D. Lin, S-C Shie, J. Y. Guo // Computer Standards & Interfaces – 2009. – Vol. 32. – P. 54–60.
3. **Konahovich, G. F.** Computer steganography. Theory and practice / G. F. Konahovich, A. Ju. Puzyrenko – К.: МК-Press, 2006. – 288 p
4. **Savchina, E. I.** Embedding of digital watermarks to frequency and spatial ares of the image / E. I. Savchina // Vestnik SibSAU – 2016. Т. 17. – № 3. – P. 631–637.
5. **Acharya, T.** Image Processing: Principles and Applications / T. Acharya, A. K. Ray. – Hoboken: John Wiley and Sons, 2005. – С. 361
6. Information technology – Digital compression and coding of continuous-tone still images: JPEG File Interchange Format (JFIF) (Rec. ITU-T T.871 (05/2011))

Поступила
01.04.2020

После доработки
14.05.2020

Принята к печати
01.06.2020

SIDORENKO A.V., SHAKINKO I.V.

THE DIGITAL WATERMARKING ALGORITHM USING DISCRETE CHAOTIC MAPS

The algorithm of formation, embedding and extracting of digital watermarks using discrete chaotic maps is considered. The key feature of the developed algorithm is the formation of the watermark using the discrete chaotic map and the restoration of this watermark after the image transmission via the communication channel. This is possible through the use of the developed method that searches for initial values of discrete chaotic map variables used in the formation of the watermark. The algorithm testing results are given. It is established that the proposed algorithm is able to identify the modified image areas. The algorithm is resistant to image conversion in JPEG format and to distortion up to 14% of the image pixel values due to the presence of noise. Thus, the proposed algorithm can be used to solve real problems of the defense of digital images transmitted by communication channels.



Сидоренко Алевтина Васильевна. Профессор кафедры физики и аэрокосмических технологий. Научные интересы: защита информации в телекоммуникационных системах, динамический хаос, теоретическая информатика, радиофизика, биофизика.

Sidorenko Alevtina Vasilevna – professor, doctor of technical sciences. Department of Radiophysics and Computer technologies. Belarusian State University. Scientific interests: information security, dynamic chaos, theoretic informatics, radiophysics, biophysics. E-mail: sidorenkoa@yandex.ru



Шакинко Иван Владимирович. Закончил аспирантуру БГУ кафедры телекоммуникаций и информационных технологий БГУ в 2018 г. Научные интересы: защита информации в телекоммуникационных системах, динамический хаос и его применение.

Shakinko Ivan Vladimirovich – post graduate. Scientific interests: information security in telecommunication systems, dynamic chaos and it's application.

Данная работа выполняется в рамках ГПНИ «Информатика, космос и безопасность».

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
В ОБРАЗОВАНИИ**

**INFORMATION
TECHNOLOGIES
IN EDUCATION**

В. П. БЕЛЯЕВ, Д. С. ЩУР, С. В. ШИРКО

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ FLASH-ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРА-ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Белорусский государственный технологический университет

В статье в целях ознакомления применения современных цифровых технологий в образовательном процессе приводится электронное мультимедийное издание по изучению интеллектуального датчика перемещения. Оно выполнено на основе Flash-технологии и имеет традиционное построение учебно-методического характера. Обучающийся имеет возможность подготовиться к выполнению работы, поскольку издание снабжено теоретической частью, раскрывающей цель и задачи, и порядком выполнения работы. Использование Flash-технологии визуализирует конструктивное построение изучаемого устройства, его поэтапное функционирование, схемные решения узлов устройства. Разъяснение работы электронных блоков сопровождается графической демонстрацией формируемых, обрабатываемых и проходящих по электрическим цепям электронных сигналов, отражающих назначение устройства, а именно получение комплекса сигналов пропорциональных качеству и количеству углового или линейного перемещения движущихся объектов. Такая визуализация позволяет заглянуть «внутрь» электронных схем, что не предоставляется возможным в реальном объекте. Особенно выделена схема определения направления движения (вращения) объекта. Приведены схемы устройств измерения скорости, основанных на двух принципах подсчета количества импульсов с выхода датчика перемещения. Разработанное электронное мультимедийное издание органически вписывается в систему дистанционного обучения как составная часть электронного университета.

Ключевые слова: образовательный процесс, flash-технологии, фотоэлектрический преобразователь

Введение

Современная тенденция развития отраслей хозяйствования государства демонстрирует динамичный переход к использованию цифровых технологий. Примерами могут служить цифровая экономика, цифровое телевидение, цифровое радиовещание, цифровая печать, цифровое банковское дело и т.п. В высшем образовании идут процессы формирования различных форм цифрового университета, одной из которых является система дистанционного образования, тем самым еще больше подчеркивается необходимость создания условий для самообразования. Дистанционное обучение является определенной формой образовательного процесса, определенным комплексом образовательных услуг, оказываемых населению. Поэтому насущным становится изготовление электронных мультимедийных изданий по техническим дисциплинам, в том числе и по лабораторным работам. Такой продукт обеспечивает обучающемуся приобретение знания по техническим специальностям, не обращаясь

к физическим объектам. Известно, что моделирование явлений, процессов, устройств является научным подходом, связанным с построением и использованием математической модели исследуемого явления, субъекта или объекта, а также систем. Моделирование проводится с целью сокращения времени, сил и средств по предсказанию возможного будущего, повышения обоснованности и точности научных прогнозов, учёта их в деятельности. Создание моделей основано на современных образовательных технологиях в качестве одной из них выступает Flash-технология. Она имеет обширные сервисные функции, которые применяются для оценки правильности действия объектов, для внесения корректирующих параметров в работу объектов с целью изучения их влияния. Несомненно, здесь на первый план выступает достоверность созданных моделей и много других аспектов учебно-методического плана, позволяющих надеяться на получение высококвалифицированного результата обучения [1].

Основная часть.

На протяжении нескольких лет на кафедре полиграфического оборудования и систем обработки информации Белорусского государственного технологического университета ведется разработка электронных мультимедийных изданий по основным дисциплинам подготовки инженера-электромеханика [2, 3]. Одной из тем подготовки выступает рассмотрение вопросов автоматизированного управления замкнутыми системами электроприводов. Наиболее распространенными в этом смысле являются электроприводы с обратной связью по скорости вращения вала исполнительного электродвигателя. Для получения информации об этой угловой физической величине в основном используется фотоэлектрический преобразователь перемещения (ФПП, энкодер, *n-coders*) [4, 5]. Традиционно на выходе такого интеллектуального датчика имеются две последовательности импульсов типа прямоугольного синуса $x = \frac{\sin \omega t}{|\sin \omega t|}$ и косинуса $y = \frac{\cos \omega t}{|\cos \omega t|}$, а также единичный импульс на один оборот его входного вала. Эти последовательности используются для построения абсолютных или относительных систем измерения скорости с целью управления электроприводами технологического оборудования. В интернет-информационном пространстве имеется большой объем разнообразных сведений об энкодерах, однако весьма кратко излагается его внутренняя конструкция, практически отсутствуют схемные решения преобразования вращательного движения в цифровую форму. В принципе это может иметь разнообразный характер и являться интеллектуальной собственностью изготовителя. Для развития инженерного мышления целесообразно обучающемуся изложить хотя бы один из вариантов конструктивного построения интеллектуального фотоэлектрического преобразователя перемещения. С этой целью было создано электронное мультимедийное издание «Фотоэлектрический преобразователь перемещения» в виде учебно-методического пособия по лабораторной работе [6].

Электронное мультимедийное издание состоит из:

– оболочки – это связующее звено для различных мультимедийных работ, которое выполняет и информационную функцию, формируя различные подсказки при работе с продуктом;

– совокупности мультимедийной работы, которая выполняет определённую задачу в процессе обучения, например: ознакомление с теоретической частью, выполнение непосредственно самой работы при изучении электрооборудования и т.д. Для создания рассматриваемого продукта использовались следующие компьютерные технологии: *HTML + JavaScript* – для создания непосредственно оболочки; *AdobeFlash + ActionScript* – для создания мультимедийной работы. Оболочка представляет собой совокупность текстовых файлов с расширением *html*. Все файлы описаны с помощью гипертекстовой разметки – *HTML* с использованием языка скриншотов *JavaScript*. Суть работы оболочки заключается в объединении всех мультимедийных объектов в единый комплекс, и предоставления удобной навигации по различным разделам продукта.

Общение с мультимедийным изданием начинается с открытия его титула. Титул информирует об авторской принадлежности мультимедийного издания: университету, факультету, кафедре, а также об учебной дисциплине (аббревиатура ЭУПО – Электронные устройства полиграфического оборудования), о названии издания. Дальнейшее движение по изданию выполняется наведением курсора мышью на кнопку «ЭУПО» и щёлканья левой клавишей мыши. Открывается главное меню, изображающее конкретизацию содержания издания: теоретические сведения, порядок выполнения работы, электронный стенд, содержание отчёта и контрольные вопросы. Тем же приёмом мышью выбирается любой интересующий обучающего раздел, что придаёт гибкость навигации по содержанию издания. Основным является электронный стенд, меню которого представлено на рис. 1.

Обучающийся сначала знакомится с основной частью ФПП, преобразующей вращательное движение в сигнал цифрового вида, обращаясь к нему указанным способом в левую крайнюю часть меню, рис. 1. Оно представляет собой оптико-механическое устройство.

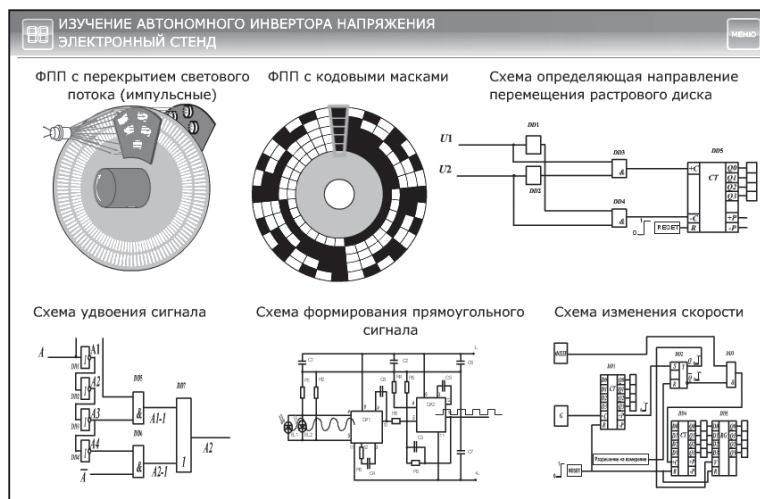


Рис. 1. Скриншот окна меню лабораторного стенда

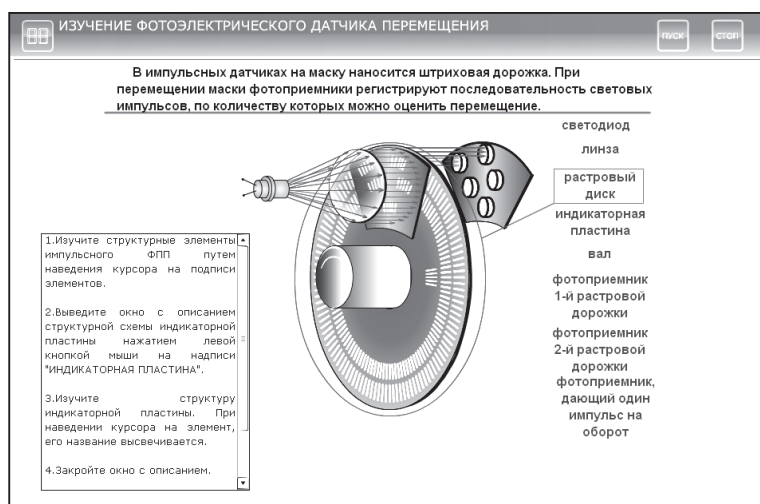
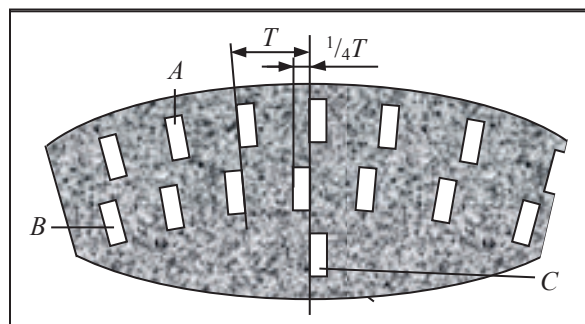


Рис. 2. Скриншот окна с оптико-механическим устройством

Основным узлом преобразования является оптико-механическое устройство, в котором имеется вращающаяся от измеряемого объекта часть в виде растрового диска со штриховыми дорожками А и В, у которых штрихи и просветы сдвинуты в пространстве по фазе относительно друг друга на $\pi/2$, т.е. на четверть периода (рис. 3). Созданный комплекс сигналов с одной и другой дорожек с помощью специальной схемы позволяет определить направление перемещения. После обработки видеосигнала (усиления и формирования фронтов импульсов), полученного оптико-механическим устройством, придающему ему четкий прямоугольный вид, обучающийся знакомится с технологией увеличения количества импульсов за один оборот растрового диска. Объект в меню расположен в левой его нижней крайней части, рис. 1.

Достаточно точная информация о перемещении объекта достигается получением как можно большего количества импульсов n в том числе и за один оборот растрового диска z . Это количество пропорционально углу поворота вала ФПП, т.е. угловому перемещению $\varphi = k_{\text{фпп}}n$, где $k_{\text{фпп}} = 360^\circ/z$ – коэффициент передачи ФПП. Это



противоречит требованиям, предъявляемым к габаритам ФПП такого типа. Современные ФПП имеют диаметр растрового диска в пределах 50 мм. Технологические ограничения позволяют нанести на диск примерно 5000 штрихов. Однако наличие двух систем прямоугольных импульсов позволяет с помощью дополнительного схемного решения получить систему двукратных импульсов по отношению к исходной, что увеличивает разрешающую способность ФПП. Такое удвоение достигается фиксированием заднего и переднего фронтов импульсов, полученных из двух систем сигналов от отверстия А и В. Скриншот окна с этой схемой показан на рис. 4.

В этом варианте схемы использована естественная продолжительность задержки распространения сигнала ($t_{\text{зад.р.}} = 30$ нс) через логический элемент НЕ (инвертор) и многократное инвертирование этого сигнала. Элемент DD5 формирует импульсы по переднему фронту входного сигнала A_{1-1} , элемент DD6 – по его заднему фронту A_{1-2} . Сформированные таким образом последовательности импульсов суммируются схемой DD7 в последовательность A_2 с удвоенной частотой следования импульсов. Обучающийся наглядно видит анимационные действия схемы и убеждается в правильности ее работы и в ее конечном результате. Кроме этого в сопровождающихся информационных окнах предлагаются сведения, касающиеся этой темы. Особой оригинальностью рассматриваемого ФПП является схемотехническое

решение схемы, определяющей направление перемещения, в частности направление вращения растрового диска (рис. 5). При этом используются две последовательности прямоугольных импульсов, у которых передние фронты как бы меняются местами при разном направлении перемещения. На эпюрах напряжения эти фронты выделены жирными линиями.

Каждая из последовательностей либо дифференцируется для получения коротких импульсов в моменты наличия фронтов либо в эти моменты формируется короткий импульс, например, одновибратором. Затем с помощью конъюнкторов DD1 и DD2 осуществляется выбор нужной последовательности коротких импульсов, обозначающих передние фронты. Например, для условно выбранного направления «Вперед» используется последовательность импульсов $U1$ и продифференцированная последовательность $U2$. Тогда на вход «+С» счетчика DD3 поступают импульсы, соответствующие перемещению, принятому за направление «Вперед», а именно фронты напряжения $U1$, поскольку они опережают передние фронты напряжения $U2$ на 90° . На вход «–С» этого счетчика импульсы не поступают, т.к. конъюнктор DD2 оказывается запертым напряжением $U2$ (рис. 5, верхняя схема), и наоборот, при перемещении «Назад» оказывается запертым конъюнктор DD1. Импульсы, обозначающие передние фронты последовательности, проходят через конъюнктор DD2 на

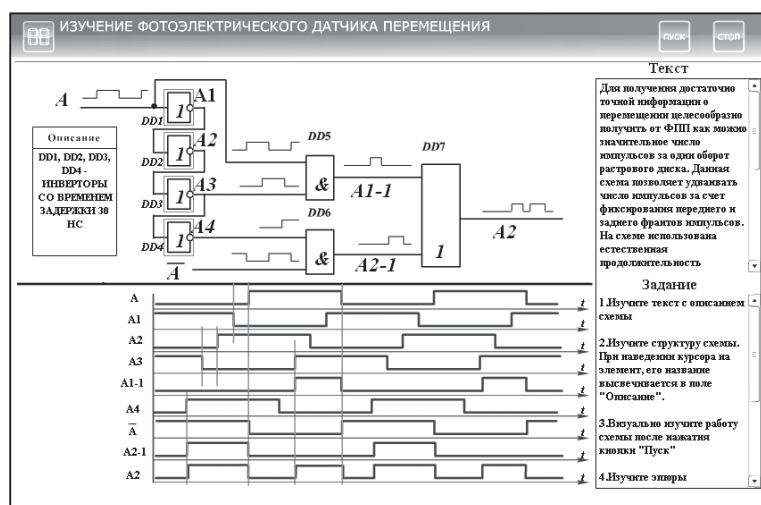


Рис. 4. Скриншот окна схемы удвоения количества импульсов



Рис. 7. Скриншот окна со схемой цифрового измерителя скорости

в том, что осуществляется подсчет числа импульсов, пропорциональных перемещению $d\varphi$, за фиксированный интервал времени $dt = T_{\text{изм}}$. Второй – заключается в том, что измеряется интервал времени $dt = T$, за который от датчика поступит некоторое количество импульсов, пропорциональное фиксированному перемещению $n = d\varphi = \text{const}$. А так, как количество импульсов за один оборот вала ФПП известно, то им определяется количество оборотов этого вала.

Заключение

Оценивая созданное на основе Flash-технологии мультимедийное издание, сформулируем некоторые выводы:

- мультимедийные программы позволяют при изложении материала дисциплины визуализировать определённые стороны технических процессов, особенно в лабораторном цикле, которые обучающийся не имеет возможности увидеть на физическом объекте (например, изменение удвоения частоты исходной

последовательности импульсов, получения кодовой комбинации на выходе счетчика при измерении скорости и т.п.);

- издание обладает определенным интеллектуальным уровнем, поскольку предоставляет компьютерную среду, которая анализирует и адекватно реагирует на действия обучающегося;

- электронное мультимедийное издание оказывает целенаправленное влияние на подготовку обучающегося. Разработанное мультимедийное издание прошло апробацию и внедрено в образовательный процесс при выполнении цикла лабораторных работ по дисциплине «Электронные устройства полиграфического оборудования»;

- созданному образовательному учебно-методическому изданию присущи: модульность, интегративность, социальность, параллельность, асинхронность, что создает его пригодность для всех форм обучения, в том числе и для дистанционного обучения, также для обучения производственного персонала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вуль, В. А. Электронные издания: Учебник / В. А. Вуль. – М.: МГУП, 2014. – 820 с.
2. Беляев, В. П. IT-технологии в образовании на примере объекта полиграфии / В. П. Беляев, Д. А. Суходолец, М. М. Рафалович // Труды БГТУ. Сер. 4. «Принт- и медиатехнологии». – 2018 – С. 16–21.
3. Беляев, В. П., «Мультимедийный комплекс по учебной дисциплине как инновационный метод обучения» // В. П. Беляев, Д. А. Суходолец, М. М. Рафалович // IV Международный форум «Скориновские чтения 2019: современные тенденции развития издательского дела» 24–25 Сентябрь 2019.
4. Каталог энкодеров. Режим доступа: <https://sensorica.by/catalog/enkodery>. Дата доступа: 01.12.2019.
5. Энкодер–устройство и принцип работы. Режим доступа: <https://contur-sb.com/enkodery-ustroystvo-i-printsip-raboty>. Дата доступа: 01.12.2019.
6. Беляев В. П. Электрооборудование полиграфических машин Минск: БГТУ, 2012. – 136 с
7. Дронов В. А. Macromedia Flash MX / В. А. Дронов. – СПб.: СПб.-Петербург, 2003. – 848 с.

8. **Лапин, П.** Самоучитель Flash MX / П. Лапин. – Издательский Дом ПИТЕР, 2003. – 153 с.
9. **Гурвиц, Майкл.** Использование Macromedia Flash MX / Майкл Гурвиц, Лора Мак-Кейб. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 704 с.

REFERENCES

1. **Vul, V.A.** Electronic publications: Textbook / V.A. Vul. – Moscow: MGUP, 2014. – 820 p.
2. **Belyaev, V.P.** IT-technologies in education on the example of a printing object / V.P. Belyaev, D.A. Sukhodolets, M.M. Rafalovich // Proceedings of BSTU. Ser. 4. "Print and media technologies". – 2018-Pp. 16–21.
3. **Belyaev, V.P.**, «Multimedia complex for academic discipline as an innovative method of training» // V.P. Belyaev, D.A. Sukhodolets, M.M. Rafalovich // IV international forum «Skorinovsky readings 2019: modern trends in the development of publishing» 24–25 September 2019.
4. Catalog of encoders. Access mode: <https://sensorica.by/catalog/enkodery>. Date of access: 01.10.2019.
5. Encoder-device and principle of operation. Access mode: <https://contur-sb.com/enkodery-ustroystvo-i-printsip-raboty>. Date of access: 01.10.2019.
6. **Belyaev V.P.** Electrical equipment of printing machines Minsk: BSTU, 2012. – 136 p
7. **Dronov V.A.** Macromedia Flash MX / V.A. Dronov. – SPb.: SPb. – Petersburg, 2003. – 848 p.
8. **Lapin, P.** Samouchitel Flash MX / P. Lapin. – PETER publishing House, 2003. – 153 p.
9. **Hurwitz, Michael.** Using Macromedia Flash MX / Michael Hurwitz, Laura McCabe. – Moscow: publishing house «Williams», 2003. – 704 p.

Поступила
10.01.2020

После доработки
06.03.2020

Принята к печати
01.06.2020

BELYAEV V. P., SHCHUR D.S.? SHIRKO S.V.

USING FLASH TECHNOLOGY IN EDUCATIONAL PROCESS TRAINING OF AN ELECTRICAL ENGINEER.

In the article in order to familiarize the use of modern digital technologies in the educational process is an electronic multimedia publication for the study of intelligent displacement sensor. It is based on Flash technology and has traditional construction of educational and methodological nature. The student has the opportunity prepare for the work, since the publication is equipped with a theoretical part, revealing the purpose and tasks, and the order of the work. Using Flash-technology visualizes the constructive construction of the device under study, its phased peration, circuit decisions of device nodes. An explanation of the operation of electronic units is accompanied by a graphic demonstration of the generated, processed and transmitted electronic circuits of electronic signals, reflecting the purpose of the device, namely obtaining a complex of signals proportional to the quality and quantity of the angular or linear movement of moving objects. Such visualization allows you to look "inside" electronic circuits, which is not provided possible in a real object. The scheme of determining the direction of movement (rotation) of an object is especially highlighted. Schemes are given speed measuring devices based on two principles of counting the number of pulses from the output of the displacement sensor. Designed electronic multimedia edition organically fits into the distance learning system as an integral part of the electronic university.

Keywords: educational process, flash-technology, photoelectric converter

Беляев Валерий Павлович, 220013, г. Минск, пер. Якуба Коласа, д. 4, кв. 55, моб. +375297714197, E-mail: bksisa@rambler.ru, Белорусский государственный технологический университет, кандидат технических наук, доцент.

Ширко Сергей Владимирович, г. Минск, ул. Белорусская, д. 21, кв. 515, моб. +375293702793, E-mail: cool.se123@yandex.by, Белорусский государственный технологический университет, студент 3 курса.

Щур Дмитрий Сергеевич, г. Минск, ул. Бобруйская, д. 25, кв. 305, моб. +375445497900, Белорусский государственный технологический университет, студент 3 курса.

Уважаемые авторы!

Общими критериями для публикации статей в журнале являются актуальность, новизна материала и его ценность в теоретическом и/или прикладном аспектах.

С целью приведения элементов данных, содержащихся в журнале, в соответствие международным требованиям зарубежных аналитических информационных систем (индексов цитирования), используемых для оценки деятельности учреждений образования при расчете показателей в международных рейтингах университетов, редколлегия журнала предлагает руководствоваться Правилами в приведенной ниже редакции приближения к унифицированной системе цитирования научных публикаций SCOPUS,

С 2016 г. Редколлегия журнала предлагает руководствоваться Правилами в приведенной ниже редакции.

Правила для авторов

1. Общие требования

Материалы статей представляются на бумажном носителе (в двух экз.) по адресу: 220013, Минск, ул. Ф. Скорины, 25/3, корп. 20, каб. 508 (Петренко Юрий Николаевич) и в электронном виде e-mail: SA_PI@bntu.by. Телефон для справок: (017) 266 26 58.

Статья, представляемая на бумажном носителе, должна быть подписана всеми авторами. К статье прилагаются сведения об авторах: фамилия, имя, отчество полностью, почтовый адрес, телефоны, адрес электронной почты, место работы, ученая степень и звание, должность. При наличии нескольких авторов должен быть указан автор, ответственный за переписку.

Статьи, поступившие в редакцию журнала, регистрируются в установленном порядке. Статьи, оформленные с нарушением приведенных правил, к рассмотрению редакцией не принимаются. Принятые статьи рецензируются.

При положительной рецензии статья предлагается к опубликованию.

Редакция не принимает статьи, опубликованные ранее в других журналах или научных изданиях.

Гонорар автору за публикацию статьи не выплачивается. Материалы, присланные в редакцию, авторам не возвращаются.

2. Правила оформления статей

2.1. Объем статей (с иллюстрациями) не должен превышать:

- для оригинальной статьи – 7 страниц (не более 8 иллюстраций);
- для краткого сообщения – 3 страниц (не более 2 иллюстраций).

Статья должна быть набрана с помощью текстового редактора Microsoft Word 2007.

Параметры страницы: формат А4 (высота 29,7 см., ширина – 21 см.); отступ для левого поля и поля сверху – 25 мм, правого и нижнего – 20 мм; нумерация страниц сверху в колонтитуле, со второй страницы, с выравниванием по правому краю.

Текст набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт. Межстрочный интервал – полуторный. Абзацный отступ – 12 мм.

2.2. Индекс УДК набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, все прописные, выравнивание – по правому краю.

2.3. Фамилия и инициалы автора (авторов) в именительном падеже, должность, ученая степень и ученое звание печатаются шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, курсив, выравнивание – по левому краю.

2.4. Название статьи набирается шрифтом Arial, 12 пт, жирный, все прописные, выравнивание – по центру.

2.5. Полное название организации (организаций), в которой работает (учится) автор (авторы) набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, выравнивается по центру. После названия организации пропускается две строки, далее следует адрес (адреса) электронной почты, пропускается две строки.

2.6. Аннотация и ключевые слова (объем 200–250 слов на русском (англ.) языке статьи набирается шрифтом TimesNewRoman, 10 пт, межстрочный интервал 1,15 пт, курсив, выравнивается по центру. Аннотация должна содержать (рекомендованная структура): цель и задачи работы, методы исследований, результаты, выводы. Аннотация должна быть пригодна для опубликования отдельно от статьи. Английский вариант не должен быть механическим переводом русского текста, а обеспечивать понимание сути работы для иностранных читателей. После аннотации пропускается одна строка.

2.7. Текст статьи (набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, с абзацем, выравнивание – по ширине) должен содержать следующие элементы:

1) *введение* (может содержать: краткий обзор литературы по проблеме исследования, перечисление нерешенных ранее вопросов, постановку проблемы, цель исследований). Слово «Введение» печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, жирный, выравнивание – по левому краю.

2) *основная часть исследования* (возможно деление на подразделы), включающая графики и другой иллюстративный материал (при их наличии), при этом таблицы и рисунки не должны дублировать друг друга. Название каждого подраздела статьи печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, жирный, выравнивание – по левому краю.

3) *Заключение* (формулируются основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ по сравнению с аналогами). Слово «Заключение» печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, жирный, выравнивание – по левому краю.

2.8. *Литература*. Список литературы оформляется шрифтом TimesNewRoman, 12 пт в соответствии с Инструкцией по оформлению диссертации, автореферата и публикаций по теме диссертации, утвержденной постановлением президиума Государственного высшего аттестационного комитета Республики Беларусь 24.12.1997 № 178 (в редакции постановления ВАК Беларуси от 22.02.2006 № 2). www.edu.grsu.by/files/liter.doc.

Слово «Литература» печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, все прописные, выравнивание – по левому краю.

Источники должны располагаться в порядке цитирования в тексте. Порядковые номера ссылок в тексте должны быть написаны внутри квадратных скобок (например: [1], [2]).

В статьях на русском языке должно быть до 10 источников, включая статьи из международных журналов, а также ссылки на собственные исследования. В англоязычных статьях должно быть до 30 источников, включая статьи из международных журналов, а также ссылки на собственные исследования. Обзорные статьи должны включать до 50 ссылок, включая статьи из международных журналов, а также ссылки на собственные исследования.

Список источников должен оформляться на русском и английском языках.

С целью повышения цитирования авторов в журнале проводится транслитерация русскоязычных источников с использованием официальных кодировок в следующем порядке: имена авторов транслитерируются латиницей, название статьи – смысловой транслитерацией (перевод на английский язык), название источника, где опубликована работа, транслитерируется латиницей, если у источника (журнала) нет официального названия на английском языке).

Для удобства транслитерации возможно использование онлайн-сервисов: <http://www.translit.ru>.

Все русскоязычные источники литературы должны быть представлены в транслитерированном варианте. За правильность приведенных в списке литературы данных ответственность несут автор(ы). В списке должны иметь место ссылки на издания, включенные в международные базы цитирования Scopus и Web of Science).

2.9. После *списка литературы* на русском и английском языках в статье на русском (англ.) языке должно следовать название статьи, список авторов, сведения о них и аннотация на английском (русском) языке.

Далее указывается: грант, гос. программа, тема госбюджетной НИР (№ Гос. регистрации) или иной документ, в рамках которой выполнена работа (или инициативная).

2.10. *Резюме авторов* (шрифтом TimesNewRoman, 10 пт.) сопровождается фотографией (3×4 см.), JPG.

2.11. *Оформление формул*. Только сложные формулы должны быть набраны с помощью встроенного в MS Word редактора формул Equation. Просто буквы с индексами могут быть набраны без использования формульного редактора с помощью средств оформления MS Word. Латинские символы должны быть набраны курсивом, как в формулах, так и на рисунках, и в тексте, а русские и греческие – обычным текстом.

В редакторе формул должен быть установлен следующий размер символов: обычный символ – 11 пт., крупный индекс – 7 пт., мелкий индекс – 5 пт., крупный символ – 17 пт., мелкий символ – 12 пт. Формулы выравниваются по центру страницы. При необходимости делать ссылки на формулы их следует нумеровать арабскими цифрами, помещенными в круглые скобки, в порядке упоминания. Номера формул выравниваются по правому краю страницы.

