

О решении задач классификации графических образов в системе Wolfram Mathematica

В. Р. Кристалинский^{1*}, С. Н. Чёрный²

¹ ФГБОУ ВО «Смоленский государственный университет», г. Смоленск, Российская Федерация 214000, Российская Федерация, г. Смоленск, ул. Пржевальского, д. 4

* kristvtr@rambler.ru

² ФГКВУ ВО «Военная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации имени Маршала Советского Союза А.М. Василевского» Министерства обороны Российской Федерации, г. Смоленск, Российская Федерация 214027, Российская Федерация, г. Смоленск, ул. Котовского, д. 2

Аннотация

В последние годы получают широкое распространение задачи, решаемые посредством интеллектуальных технологий. Поэтому в современные системы компьютерной математики также включаются средства, позволяющие решать задачи путем применения технологий искусственного интеллекта. В частности, сюда относится решение задач классификации графических образов, то есть отнесения графического образа к тому или иному классу. При решении задач этого типа используется машинное обучение. Средства решения задач классификации, в частности, графических образов включены в последние версии системы Wolfram Mathematica. Система Wolfram Mathematica дает возможность строить функцию-классификатор, причем с использованием различных алгоритмов, определять вероятности принадлежности образа к тому или иному классу, строить матрицу ошибок классификации, выводить другую информацию о свойствах классификатора. Кроме графических образов классификаторы могут строиться для числовых, текстовых и других типов данных. В работе рассматривается приложения этих новых возможностей системы Wolfram Mathematica к решению задач, возникающих в практике противовоздушной обороны: распознавания беспилотных летательных аппаратов по их изображениям и распознаванию воздушных целей по их радиолокационным дальностным портретам. Эти задачи имеют важное прикладное значение, и предлагаемая нами методика их решения средствами Wolfram Mathematica может применяться как в ходе научных исследований, так и при ознакомлении курсантов военных училищ с возможностями современных технологий искусственного интеллекта. При этом использование системы Wolfram Mathematica позволяет пользоваться ее стандартным интерфейсом, с которым ранее учащиеся или исследователи знакомились при решении других задач.

Ключевые слова: классификация графических образов, система Wolfram Mathematica

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кристалинский, В. Р. О решении задач классификации графических образов в системе Wolfram Mathematica / В. Р. Кристалинский, С. Н. Чёрный. – DOI 10.25559/SITITO.17.202102.464-472 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2021. – Т. 17, № 2. – С. 464-472.

© Кристалинский В. Р., Чёрный С. Н., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



On Solving Problems of Classification of Graphic Images in the Wolfram Mathematica System

V. R. Kristalinskii^a, S. N. Chernyi^b

^a Smolensk State University, Smolensk, Russian Federation

4 Przhevsky St., Smolensk 214000, Russian Federation

* kristvr@rambler.ru

^b Russian Federation Armed Forces Army Air Defence Military Academy named after Marshal of the Soviet Union A.M. Vasilevsky, Smolensk, Russian Federation

2 Kotovsky St., Smolensk 214027, Russian Federation

Abstract

In recent years, problems solved through intelligent technologies have become widespread. Therefore, modern computer mathematics systems also include tools that allow solving problems through the use of artificial intelligence technologies. In particular, this includes solving problems of classification of graphic images, that is, assigning a graphic image to a particular class. When solving problems of this type, machine learning is used. Tools for solving classification problems, in particular, graphic images, are included in the latest versions of the Wolfram Mathematica system. The Wolfram Mathematica system makes it possible to build a classifier function, and using various algorithms, to determine the probabilities of an image belonging to a particular class, to build a classification error matrix, to output other information about the properties of the classifier. In addition to graphical images, classifiers can be built for numeric, text, and other data types. The paper considers the applications of these new capabilities of the Wolfram Mathematica system to solving problems that arise in the practice of air defense: recognition of unmanned aerial vehicles by their images and recognition of air targets by their radar range portraits. These tasks are of great applied importance, and the proposed method of solving them using Wolfram Mathematica can be used both in the course of scientific research and when familiarizing military school cadets with the capabilities of modern artificial intelligence technologies. At the same time, the use of the Wolfram Mathematica system allows you to use its standard interface, which students or researchers previously got acquainted with when solving other problems.

Keywords: classification of graphic images, Wolfram Mathematica system

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Kristalinskii V.R., Chernyi S.N. On Solving Problems of Classification of Graphic Images in the Wolfram Mathematica System. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2021; 17(2):464-472. DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202102.464-472>



Введение

Одной из главных тенденций в развитии информационных технологий в последние годы является увеличение роли интеллектуальных систем и технологий. Они становятся неотъемлемой частью многих программных продуктов, в том числе, систем компьютерной математики. В этом направлении идет и развитие системы Wolfram Mathematica. В ее последних версиях появились, в частности, возможности классификации объектов, в том числе, графических образов, реализуемые с помощью алгоритмов машинного обучения. Это дает возможность использовать систему для решения целого ряда новых задач. При этом решение этих задач в системе реализовано таким образом, что пользователь, не являющийся специалистом в области программирования, легко может начать использовать эти возможности Mathematica для решения задач в своей профессиональной сфере, особенно, если он ранее решал в данной системе другие задачи. Этим данный подход к решению задач классификации графических образов выгодно отличается от широко используемых для этих целей библиотек, например, разработанной фирмой Microsoft библиотеки Accord. При этом система позволяет выбирать алгоритм классификации из нескольких возможных, таких, как метод логистической регрессии, метод построения деревьев решений, наивный байесовский метод и другие. Наиболее эффективной эта методика является в случае, когда число возможных классов относительно невелико. Данная методика решения задач классификации графических образов описана нами в статье [1]. Настоящая работа посвящена применению этого подхода к решению еще одной задачи распознавания образов, а также задачи, аналогичной рассмотренной в [1], но при более обширном тренировочном множестве.

Задача распознавания графических образов возникает, в частности, в практике функционирования противовоздушной обороны. В работе предполагается рассмотреть два класса задач распознавания образов из практики войсковой ПВО – задача распознавания беспилотных летательных аппаратов по их внешнему виду и задача распознавания воздушных целей по их радиолокационным дальностным портретам. Использование системы Mathematica для решения этих задач может быть полезно, во-первых, при проведении научных исследований, а во-вторых при ознакомлении курсантов военных учебных заведений с возможностями современных интеллектуальных систем на примерах из сферы их будущей профессиональной деятельности.

Как указано в [2], «результаты анализа опыта применения

средств воздушного нападения (СВН) в последних военных конфликтах свидетельствуют о возрастающей роли беспилотных летательных аппаратов, обусловленной быстрым и интенсивным процессом развития робототехнических систем военного назначения». В связи с этим, задача распознавания типа беспилотного летательного аппарата по его графическому изображению является весьма актуальной, особенно учитывая малые размеры БПЛА и связанную с ними его невысокую заметность [3], [7-12].

Основным средством обнаружения воздушных целей в системах противовоздушной обороны являются радиолокационные системы. Известно несколько способов распознавания вида воздушной цели на основе обработки радиолокационной информации. Один из них основан на использовании так называемых радиолокационных дальностных портретов. Первые публикации, в которых предлагался данный метод, появились в 80-х годах 20 века. Однако решать эту проблему с помощью искусственного интеллекта начали лишь в последние годы. В частности, ряд алгоритмов решения классификации радиолокационных дальностных портретов воздушных целей был предложен в работе, однако использование для этой цели возможностей системы Mathematica на наш взгляд проще и эффективнее [13], [22].

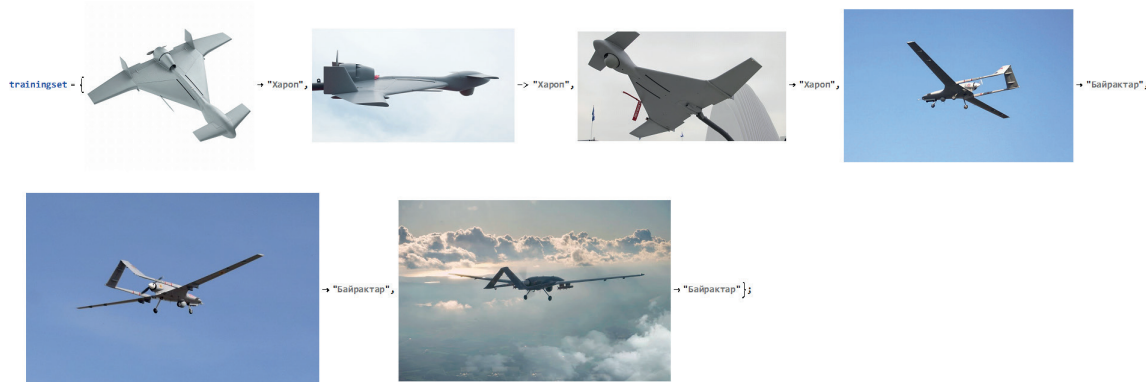
Целью исследования является рассмотрение возможностей системы Wolfram Mathematica по распознаванию графических образов на примере задач, возникающих в практике противовоздушной обороны.

Распознавание беспилотных летательных аппаратов средствами Wolfram Mathematica

Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) – это летательный аппарат без экипажа на борту. В настоящее время существует большое количество типов БПЛА как гражданского, так и военного назначения. БПЛА военного назначения могут обладать различной степенью автономности и решать различные задачи – от разведывательных до боевых.

Решим в системе Wolfram Mathematica задачу распознавания БПЛА двух видов – Harop производства Израиля и Bayraktar производства Турции. Все используемые в примере фотографии взяты из общедоступных ресурсов сети Internet.

Строим тренировочное множество.



Строим функцию-классификатор.

```
c = Classify[trainingset]
      |классифицировать
```

ClassifierFunction |  Method: LogisticRegression
Number of classes: 2

Расознаем образ.



Нагор

Система определила, что на представленной фотографии изображен БПЛА Нагор. Это соответствует действительности. Построим матрицу ошибок, иллюстрирующую точность построения классификатора.

```
cm=ClassifierMeasurements[c,trainingset,"ConfusionMatrixPlot"]
```



Распознавание воздушных целей по радиолокационным дальностным портретам

Ещё одним видом задач, связанных с распознаванием образов, возникающих в практике войсковой ПВО, является задача распознаванию воздушной цели по ее радиолокационному дальностному портрету.

Радиолокационный дальностный портрет воздушной цели, строится на основе одномерного пространственного распределения интенсивности поля обратного рассеяния электромагнитной волны в сантиметровом или миллиметровом диапазонах длин волн, содержит информацию о геометрической форме обнаруженной цели. Это связано с тем, что переотраженный сигнал от различных точек на поверхности воздушной цели состоит из ряда дискретных сигналов, не перекрывающихся во времени. Расположение таких сигналов на временной оси и их количество устойчиво и соответствует геометрической форме облучаемого объекта и его ракурсу относительно РЛС. Таким образом, мы получаем графический образ, устойчиво связанный с геометрической формой воздушной цели и тем самым позволяющий осуществить ее распознавание. Такого рода портреты собираются экспериментально и могут храниться в базе данных¹.

Приведем рисунок, показывающий основные части самолета, формирующие радиолокационный дальностный портрет.

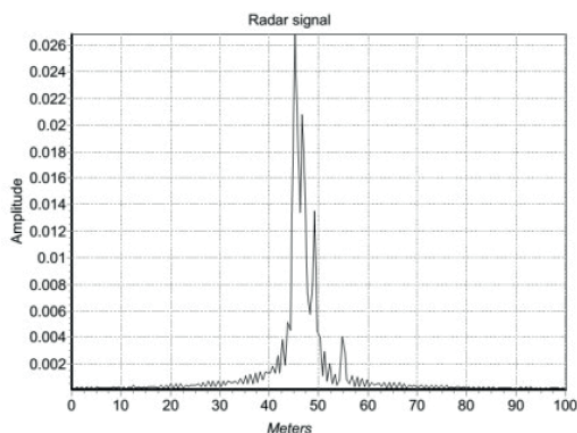


Р и с. 1. Формирование радиолокационного дальностного портрета
F i g. 1. Formation of a radar range portrait

На рисунке 2 изображен радиолокационный дальностный портрет самолета МИГ-21, полученный с помощью программы-симулятора, разработанной под руководством В.Д. Ширмана ([4]).

¹ Св-во о гос. регистрации прогм. для ЭВМ № 2020665215 РФ. Программное обеспечение численного расчета дальностных радиолокационных портретов: № 2020664555: заявл. 18.11.2020 : опубл. 24.11.2020 / Н. Д. Карасев, У. Г. Ибрагимов, М. А. Кудров [и др.]; заявитель МФТИ.

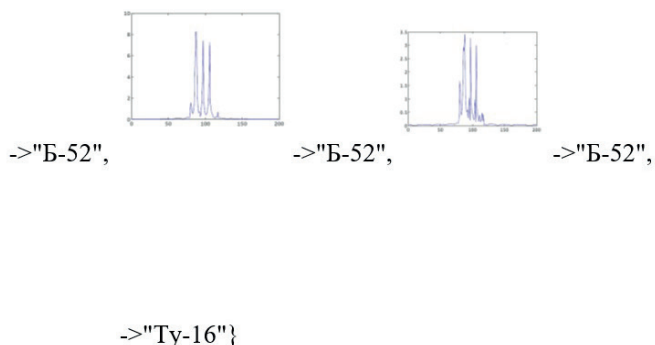
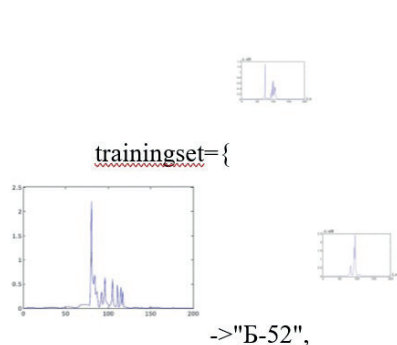




Р и с. 2. Радиолокационный дальностный портрет самолета МИГ-21
F i g. 2. Radar long-range portrait of the MiG-21 aircraft

Все дальностные портреты, используемые в настоящей работе, взяты в этом же источнике.

Одной из первых публикаций, посвященных распознаванию воздушных целей по их дальностным портретам является книга [5]. Этот метод используется на практике, несмотря на его недостатки, в частности, слабую устойчивость к помехам.



Для построения тренировочного множества взяты четыре портрета самолета Б-52, полученные при различных курсовых углах и один портрет самолета Ту-16. Строим функцию-классификатор.

```
c=Classify[trainingset]
```

Распознаем образ.

```
c[ ]
```

Ту-16

Однако подход к этой проблеме на основе технологий искусственного интеллекта появился лишь в последние годы.

Необходимость использования при решении рассматриваемой задачи технологий распознавания образов связана во-первых, с тем, при разных курсовых углах (углах в плоскости истинного горизонта наблюдателя между продольной осью летательного аппарата и направлением на наблюдателя) получаются различные дальностные портреты, а во-вторых с тем, что в реальной обстановке могут осуществляться действия, направленные на искажение портрета [14-21].

Приложению к распознаванию дальностных портретов искусственного интеллекта посвящены, в частности, исследование² и статья [6]. В этих работах предлагается ряд алгоритмов, предназначенных для этой цели. На наш взгляд при практической реализации данного подхода при решении учебных и научно-исследовательских задач может оказаться полезным применение системы Wolfram Mathematica.

Нами был построен документ в системе Wolfram Mathematica реализующий распознавание двух типов воздушных целей по их радиолокационным дальностным портретам. Первый подход к его построению был представлен в [1], в настоящей работе представлен документ построенный на более объемном тренировочном множестве. А именно, решим задачу распознавания дальностных портретов самолетов Б-52 и Ту-16.

Строим тренировочное множество.

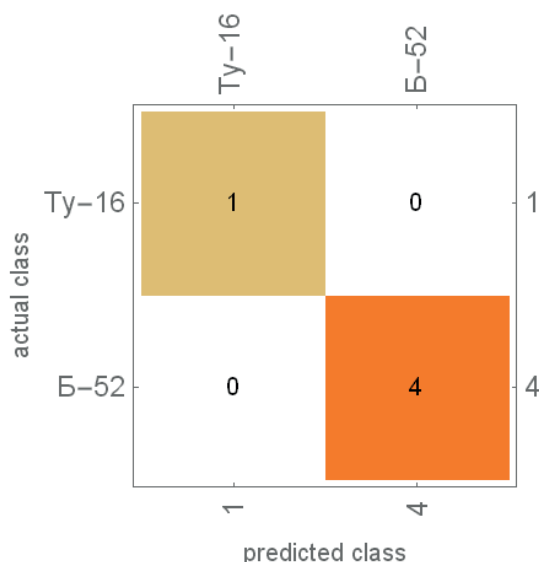
Таким образом, представленный системе для распознавания распознан как радиолокационный дальностный портрет самолета Ту-16, что соответствует действительности.

Строим матрицу ошибок.

```
cm=ClassifierMeasurements[c,trainingset,"ConfusionMatrixPlot"]
```

² Кыюнг Ф. Ф. Анализ и идентификация радиолокационных дальностных портретов воздушных целей на основе технологий вычислительного интеллекта: дис. ...канд. тех. наук. Москва, 2017. 146 с.





Полученная матрица свидетельствует о высоком качестве построения классификатора. При этом на его построение тратится 1 секунда.

Таким образом, приведенный пример показывает, что система Wolfram Mathematica успешно справляется с задачей распознавания радиолокационных дальностных портретов, даже при небольших тренировочных множествах [23-25]. Эта методика может быть использована при проведении научных исследований, в учебном процессе военных вузов, а также, при определенных условиях, и при распознавании реальных воздушных целей.

Заключение

Магистральным направлением развития современных компьютерных математических систем является включение в них технологий искусственного интеллекта. Это значительно расширяет круг задач, решаемых системами и соответственно, их возможных пользователей. Не стала исключением и система Wolfram Mathematica.

Появление в системе алгоритмов классификации, в частности, графических образов, при сохранении хорошо известного интерфейса системы, дает возможность пользователям, хорошо знакомым с Wolfram Mathematica как средством решения математических задач, использовать ее в новой области. В полной мере это относится и к специалистам войсковой ПВО. В их практике задачи распознавания образов, в частности, описываемые в настоящей статье, встречаются достаточно часто. Очевидна и необходимость включения в программу обучения курсантов военных учебных заведений знакомства с системами искусственного интеллекта. И лучше всего это сделать на задачах, известных им из практики их службы и средствами, с которыми они ранее могли знакомиться при обучении другим дисциплинам.

Таким образом, предлагаемая нами методика решения задач распознавания образов в системе Wolfram Mathematica может быть весьма эффективной при проведении научных исследований и в учебном процессе военных училищ и академий.

Список использованных источников

- [1] Кристалинский, В. Р. Решение задач классификации в системе Wolfram Mathematica / В. Р. Кристалинский, В. В. Борисов // Системы компьютерной математики и их приложения. – 2021. – № 22. – С. 62-67. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46649874> (дата обращения: 17.03.2021). – Рез. англ.
- [2] Особенности борьбы с тактическими беспилотными летательными аппаратами / А. В. Зайцев, И. И. Назарчук, О. О. Красавцев, Д. А. Кичулкин // Военная мысль. – 2013. – № 5. – С. 37-43. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19093589> (дата обращения: 17.03.2021). – Рез. англ.
- [3] Briones, J. C. Multi-Mode Radar Target Detection and Recognition Using Neural Networks / J. C. Briones, B. Flores, R. Cruz-Cano. – DOI 10.5772/52073 // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2012. – Vol. 9, issue 5. – Article 177.
- [4] Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, & Tracking / ed. by Y. D. Shirman. – Boston, London: Artech House, 2001. – 307 p.
- [5] Небабин, В. Г. Методы и техника радиолокационного распознавания / В. Г. Небабин, В. В. Сергеев. – М.: Радио и связь, 1984. – 152 с.
- [6] Филимонов, А. Б. Динамическое распознавание воздушных целей по радиолокационным дальностным портретам / А. Б. Филимонов, Фам Фьюнг Кьюнг // Информационные технологии. – 2016. – Т. 22, № 6. – С. 423-430. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26233751> (дата обращения: 17.03.2021). – Рез. англ.
- [7] Беляева, Е. В. Исследование методов выделения границ в задаче распознавания объектов на изображениях с низкой контрастностью / Е. В. Беляева, М. А. Земцова. – DOI 10.34219/2078-8320-2021-12-1-123-128 // Информатизация и связь. – 2021. – № 1. – С. 123-128. – Рез. англ.
- [8] Шабанов, Р. М. Нечеткая теория: модели и алгоритмы распознавания графических образов / Р. М. Шабанов // Научный аспект. – 2020. – Т. 15, № 2. – С. 1881-1885. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43116872> (дата обращения: 17.03.2021).
- [9] Козлов, А. С. Методология распознавания графических изображений на базе векторной машины / А. С. Козлов, С. В. Дудник, Н. М. Култазин // Наука и образование сегодня. – 2020. – № 9(56). – С. 14-20. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43923132> (дата обращения: 17.03.2021).
- [10] Обнаружение-распознавание беспилотных летательных аппаратов с использованием составной модели авторегрессии и их акустического излучения / Тихонов В. А. [и др.]. – DOI 10.20535/RADAR.2020.81.38-46 // Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника, Радиоаппаратостроение. – 2020. – № 81. – С. 38-46. – Рез. англ.
- [11] Толочков, Д. В. Двухспектральная оптико-электронная система обнаружения и распознавания малоразмерных беспилотных летательных аппаратов / Д. В. Толочков, А. В. Попов // Состояние и перспективы развития



- современной науки по направлению «Информатика и вычислительная техника». – Анапа: ФГАУ «ВИТ "ЭРА"», 2020. – С. 65-76. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42935413> (дата обращения: 17.03.2021).
- [12] Толмачев, А. В. Проблемы обнаружения и распознавания малоразмерных летательных аппаратов на малых высотах / А. В. Толмачев, С. Р. Гейстер // Радиолокация, навигация, связь. – Воронеж: ВГУ, 2020. – С. 16-21. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44424850> (дата обращения: 17.03.2021). – Рез. англ.
- [13] Кристаллинский, В. Р. О моделировании методов наведения самонаводящихся ракет в системе Wolfram Mathematica / В. Р. Кристаллинский, С. Н. Чёрный. – DOI 10.25559/SITITO.16.202003.686-694 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2020. – Т. 16, № 3. – С. 686-694. – Рез. англ.
- [14] Володин, А. В. Метод распознавания классов воздушных целей по радиальному размеру их радиолокационных дальностных портретов / А. В. Володин // Аллея науки. – 2017. – Т. 2, № 15. – С. 141-144. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32299905> (дата обращения: 17.03.2021).
- [15] Методика формирования признаков распознавания на основе вейвлет-преобразования радиолокационных дальностных портретов / И. В. Сисигин, К. О. Колесников, Д. А. Равдин [и др.]. – DOI 10.17516/1999-494X-2017-10-2-277-285 // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10, № 2. – С. 277-285. – Рез. англ.
- [16] Разработка алгоритма повышения контрастности дальностного портрета цели для решения задач распознавания воздушных объектов / С. С. Козорез, А. В. Пискунов, Ю. В. Красников, П. В. Пустозеров // Вестник воздушно-космической обороны. – 2017. – № 3(15). – С. 13-19. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30102035> (дата обращения: 17.03.2021). – Рез. англ.
- [17] Comparison of machine and deep learning for the classification of cervical cancer based on cervicography images / Y. R. Park [и др.]. – DOI 10.1038/s41598-021-95748-3 // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. – Article 16143.
- [18] Khan, I. A comparative study of graphic symbol recognition methods / I. Khan, N. Islam [и др.]. – DOI 10.1007/s11042-018-6289-6 // Multimedia Tools and Applications. – 2020. – Vol. 79, issue 13-14. – Pp. 8695-8725.
- [19] García-Domínguez, M. FrImCla: A Framework for Image Classification Using Traditional and Transfer Learning Techniques / M. García-Domínguez [и др.]. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.2980798 // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – Pp. 53443-53455.
- [20] Kartashov, V. Use of Acoustic Signature for Detection, Recognition and Direction Finding of Small Unmanned Aerial Vehicles / V. Kartashov [и др.]. – DOI 10.1109/TCSET49122.2020.235458 // 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). – IEEE Press, Lviv-Slavske, Ukraine, 2020. – Pp. 1-4.
- [21] Solis, E. R. Implementation of Audio Recognition System for Unmanned Aerial Vehicles / E. R. Solis, D. V. Shashev, S. V. Shidlovskiy. – DOI 10.1109/SIBCON50419.2021.9438906 // 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Kazan, Russia, IEEE Press, 2021. – Pp. 1-8.
- [22] Ribeiro, V. H. A. Multiobjective optimization design procedures for data-driven unmanned aerial vehicles automatic target recognition systems / V. H. A. Ribeiro, G. Reynoso-Meza, L. S. Coelho. – DOI 10.1016/B978-0-12-820276-0.00017-0 // Unmanned Aerial Systems. Theoretical Foundation and Applications. Advances in Nonlinear Dynamics and Chaos (ANDC) / ed. by A. Koubaa, A. T. Azar. – Academic Press, 2021. – Pp. 231-256.
- [23] Classification and Recognition of Objects on Radar Portraits Formed by the Equipment of Mobile Small-Size Radar Systems / A. A. Sentsov, S. A. Ivanov, S. A. Nenashev, E. L. Turnetskaya. – DOI 10.1109/WECONF48837.2020.9131475 // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – St. Petersburg, Russia: IEEE Press, 2020. – Pp. 1-4.
- [24] Geister, S. R. Accelerated Algorithms of Processing Non-Related Radar Portraits of Objects Under Different Jamming Conditions / S. R. Geister, S. V. Shalyapin. – DOI 10.1615/TelecomRadEng.v54.i8-9.180 // Telecommunications and Radio Engineering. – 2000. – Vol. 54, issue 8-9. – Pp. 40-53.
- [25] Golyak, I. S. Methods for real-time optical location and tracking of unmanned aerial vehicles using digital neural networks / I. S. Golyak [и др.]. – DOI 10.1117/12.2573209 // Proceedings SPIE 11394, Automatic Target Recognition XXX, 113941B. – SPIE, 2020.

Поступила 17.03.2021; одобрена после рецензирования 26.04.2021; принята к публикации 21.05.2021.

Об авторах:

Кристаллинский Владимир Романович, доцент кафедры информатики, физико-математический факультет, ФГБОУ ВО «Смоленский государственный университет» (214000, Российская Федерация, г. Смоленск, ул. Пржевальского, д. 4), кандидат физико-математических наук, доцент, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1205-990X>**, kristivr@rambler.ru

Чёрный Сергей Николаевич, начальник научно-исследовательского центра, ФГКВУ ВО «Военная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации имени Маршала Советского Союза А.М. Василевского» Министерства обороны Российской Федерации (214027, Российская Федерация, г. Смоленск, ул. Котовского, д. 2), кандидат технических наук, доцент, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3038-2789>**, Turov_black@mail.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



References

- [1] Kristalinskii V.R., Borisov V.N. On the solving classification problems in the Wolfram Mathematica system. *Sistemy komp'yuternoj matematiki i ih prilozheniya* = Computer Mathematics Systems and Their Applications. 2021; (22):62-67. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46649874> (accessed 19.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [2] Zaytsev A.V., Nazarchuk I.I., Krasavtsev O.O., Kichulkin D.A. *Osobennosti bor'by s takticheskimi bespilotnymi letatel'nymi apparatami* [Features of the fight against tactical unmanned aerial vehicles]. *Voennaya Mysl'* = Military Thought. 2013; (5):37-43. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19093589> (accessed 19.03.2021). (In Russ.)
- [3] Briones J.C., Flores B., Cruz-Cano R. Multi-Mode Radar Target Detection and Recognition Using Neural Networks. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2012; 9(5):177. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5772/52073>
- [4] Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, & Tracking. In: Ed. by Y. D. Shirman. Artech House, Boston, London; 2001. 307 p. (In Eng.)
- [5] Nebabin V.G., Sergeev V.V. *Metody i tekhnika radiolokacionnogo raspoznavaniya* [Methods and technology of radar recognition]. Radio and Communication, Moscow; 1984. 152 p. (In Russ.)
- [6] Filimonov A.B., Fam Fuong Kuong. Dynamic Aerial Target Recognition by Using Radar Range Profiles. *Informacionnye Tehnologii* = Information Technologies. 2016; 22(6):423-430. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26233751> (accessed 19.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [7] Belyaeva E.V., Zemtsova M.A. Research of edge detection methods in the task of pattern recognition on images with low contrast. *Informatization and communication*. 2021; (1):123-128. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.34219/2078-8320-2021-12-1-123-128>
- [8] Shabanov R.M. *Nechetkaya teoriya: modeli i algoritmy raspoznavaniya graficheskikh obrazov* [Fuzzy Theory: Pattern Recognition Models and Algorithms]. *Nauchnyj Aspect*. 2020; 15(2):1881-1885. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43116872> (accessed 19.03.2021). (In Russ.)
- [9] Kozlov A.S., Dudnik S.V., Kultazin N.M. *Metodologiya raspoznavaniya graficheskikh izobrazhenij na baze vektornoj mashiny* [Methodology for recognition of graphic images based on a vector machine]. *Nauka i obrazovanie segodnya* = Science and Education Today. 2020; (9):14-20. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43923132> (accessed 19.03.2021). (In Russ.)
- [10] Tikhonov V.A. et al. Detection-Recognition of Unmanned Aerial Vehicles using the Composed Auto-Regression Model of their Acoustic Radiation. *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*. 2020; (81):38-46. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.81.38-46>
- [11] Tolochkov D.V., Popov A.V. *Dvuhspektral'naya optiko-elektronnaya sistema obnaruzheniya i raspoznavaniya malorazmernih bespilotnykh letatel'nykh apparatov* [Two-spectrum optical-electronic system for detection and recognition of small unmanned aerial vehicles]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoj nauki po napravleniyu "Informatika i vychislitel'naya tekhnika"* = Proceedings of the Conference on Informatics and Computer Engineering. ERA, Anapa; 2020. p. 65-76. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42935413> (accessed 19.03.2021). (In Russ.)
- [12] Tolmachov A.V., Heister S.R. Problems of detection and recognition of small-sized aircraft at small altitudes. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference on Radiolocation, Navigation, Communication (RLNC'2020)*. VSU, Voronezh; 2020. p. 16-21. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44424850> (accessed 19.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [13] Kristalinskii V.R., Chernyi S.N. On Modeling Homing Missile Guidance Methods in the Wolfram Mathematica System. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technologies and IT-Education. 2020; 16(3):686-694. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25559/SITI-TO.16.202003.686-694>
- [14] Volodin A.V. *Metod raspoznavaniya klassov vozdushnykh celej po radial'nomu razmeru ih radiolokacionnykh dal'nostnykh portretov* [A method for recognizing classes of air targets by the radial size of their radar range portraits]. *Nauchno-prakticheskii elektronnyi zhurnal Alleya Nauki* = Scientific and practical electronic journal of the Alley of Science. 2017; 2(15):141-144. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32299905> (accessed 19.03.2021). (In Russ.)
- [15] Sisigin I.V. et al. The method of forming the recognition signs based on the wavelet transform of radar range portraits. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2017; 10(2):277-285. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-2-277-285>
- [16] Kozorez S.S., Piskunov A.V., Krasnikov Yu.V., Pustozero P.V. Algorithm design of target range image contrast enhancement for aerial objects discrimination. *Vestnik vozdušno-kosmičeskoj oborony* = Aerospace Defense Herald. 2017; (3):13-19. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30102035> (accessed 19.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [17] Park Y.R. Comparison of machine and deep learning for the classification of cervical cancer based on cervicography images. *Scientific Reports*. 2021; 11:16143. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95748-3>
- [18] Khan I., Islam N., Ur Rehman H. et al. A comparative study of graphic symbol recognition methods. *Multimedia Tools and Applications*. 2020; 79(13-14):8695-8725. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-018-6289-6>
- [19] García-Domínguez M., Domínguez C., Heras J., Mata E., Pascual V. FrImCla: A Framework for Image Classification Using Traditional and Transfer Learning Techniques. *IEEE Access*. 2020; 8:53443-53455. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2980798>
- [20] Kartashov V., et al. Use of Acoustic Signature for Detection, Recognition and Direction Finding of Small Unmanned



- Aerial Vehicles. *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. IEEE Press, Lviv-Slavske, Ukraine; 2020. p. 1-4. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235458>
- [21] Solis E.R., Shashev D.V., Shidlovskiy S.V. Implementation of Audio Recognition System for Unmanned Aerial Vehicles. *2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. IEEE Press, Kazan, Russia; 2021. p. 1-8. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/SIBCON50419.2021.9438906>
- [22] Ribeiro V.H.A., Reynoso-Meza G., Coelho L.S. Multiobjective optimization design procedures for data-driven unmanned aerial vehicles automatic target recognition systems. In: Ed. by A. Koubaa, A. T. Azar. *Unmanned Aerial Systems. Theoretical Foundation and Applications. Advances in Nonlinear Dynamics and Chaos (ANDC)*. Academic Press, 2021. p. 231-256. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820276-0.00017-0>
- [23] Sentsov A.A., Ivanov S.A., Nenashev S.A., Turnetskaya E.L. Classification and Recognition of Objects on Radar Portraits Formed by the Equipment of Mobile Small-Size Radar Systems. *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. IEEE Press, St. Petersburg, Russia; 2020. p. 1-4. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131475>
- [24] Geister S.R., Shalyapin S.V. Accelerated Algorithms of Processing Non-Correlated Radar Portraits of Objects Under Different Jamming Conditions. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2000; 54(8-9):40-53. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v54.i8-9.180>
- [25] Golyak I.S., Anfimov D.R., Golyak I.S., Morozov A.N., Tabalina A.S., Fufurin I.L. Methods for real-time optical location and tracking of unmanned aerial vehicles using digital neural networks. *Proceedings SPIE 11394, Automatic Target Recognition XXX*, 113941B. SPIE; 2020. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2573209>

*Submitted 17.03.2021; approved after reviewing 26.04.2021;
accepted for publication 21.05.2021.*

About the authors:

Vladimir R. Kristalinskii, Associate Professor of the Department of Computer Science, Faculty of Physics and Mathematics, Smolensk State University (4 Przhhevalsky St., Smolensk 214000, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1205-990X>, kristvr@rambler.ru

Sergei N. Chernyi, Head of the Scientific and Research Centre, Russian Federation Armed Forces Army Air Defence Military Academy named after Marshal of the Soviet Union A.M. Vasilevsky (2 Kotovsky St., Smolensk 214027, Russian Federation), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3038-2789>, Turov_black@mail.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

