

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
И ПРИКЛАДНАЯ
ИНФОРМАТИКА**

№ 2, 2024



**SYSTEM ANALYSIS
AND APPLIED
INFORMATION SCIENCE**

No 2, 2024

**Международный
научно-технический журнал**

Издается с декабря 2012 года

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет

Главный редактор

Сергей Васильевич Харитончик

Редакционная коллегия

Д. В. Капский (зам. главного редактора),
А. М. Авсиевич, А. А. Большаков (РФ),
В. А. Вишняков, Л. С. Герасимович,
А. В. Гулай, Н. Н. Гурский,
Г. О. Кипиани (Грузия),
А. С. Климчик (РФ), А. А. Лобатый,
В. А. Малкин, А. В. Малолетов (РФ),
Ф. М. Нуралиев (Узбекистан),
И. А. Сатиков (ответственный секретарь),
В. В. Старовойтов, Ю. Ф. Яцына

**International
Science and Technical Journal**

Published since December, 2012

Founder

Belarusian National
Technical University

Editor-in-chief

Sergei V. Kharytonchyk

Editorial board

D. Kapski (deputy editor-in-chief),
A. Ausiyevich, A. Bolshakov (RF),
V. Vishnyakou, L. Gerasimovich,
A. Gulaj, N. Gursky,
G. Kipiani (Georgia),
A. Klimchik (RF), A. Lobaty,
V. Malkin, A. Maloletov (RF),
F. Nuraliev (Uzbekistan),
I. Satikov (executive secretary),
V. Starovoitov, U. Yatsyna

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 |

Ведущий научный редактор

И. А. Сатиков

Технический редактор

О. Л. Чабарова

Адрес редакции

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

Executive secretary of the editorial board

I. Satikov

Technical Editor

V. Chabarava

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 00.00.2024. Формат бумаги 60х84 1/8. Бумага мелованная.

Цифровая печать. Усл. печ. л. 6,98. Уч.-изд. л. 4,52. Тираж 20 экз. Заказ 0000.

Отпечатано в БНТУ. ЛП № 38200000006896 от 03.03.2014.

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

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Karasik O.N., Prihozhy A.A.

Blocked algorithm of finding all-pairs shortest paths in graphs divided into weakly connected clusters.....4

Асадов Хикмет Гамид Оглы, Абилова Наргиз Шамил Гызы, Нуриева Лале Имран Гызы

Метод структурно-блочного синтеза систем дистанционного зондирования.....11

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Инютин А.В., Лукашевич М.М.

Детекция дефектов печатных плат на основе архитектуры YOLOV8.....16

Бумай А.Ю.

Методы построения траекторий движения беспилотных летательных аппаратов при облете заданных областей пространства.....25

Шейников А.А., Малкин В.А., Смоленский Э.А., Иваницкий Л.А.

Оптико-электронная корреляционно-экстремальная навигационная система малого беспилотного летательного аппарата.....30

Yudakov V. S., Sulim P.E.

An algorithm and a program for configuring risograph-ic printing, taking into account the printing properties of paper.....41

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

Акулич С.В., Колеснева И.П., Жук А.А.

Основные этапы имитационного моделирования и их реализация в системе поддержки принятия решений.....47

Вишняков В.А., Ся И.В.

Система ИОТ для диагностики болезни Паркинсона с использованием нейронных сетей и OSTIS.....52

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS

Karasik O.N., Prihozhy A.A.

Blocked algorithm of finding all-pairs shortest paths in graphs divided into weakly connected clusters.....4

Asadov Hikmet Gamid Ogly, Abilova Nargiz Shamil Gyzy, Nurieva Lale Imran Gyzy

Method of structural block synthesis of remote sensing system.....11

MANAGEMENT OF TECHNICAL OBJECTS

Inyutin A.V., Lukashevich M.M.

PCB defect detection based on YOLOV8 architecture.....16

Bumai A.Y.

Methods for formation trajectories of motion of unmanned aircraft vehicles when flying around specified areas of space.....25

Sheinikov A.A., Malkin V.A., Smolensky E.A., Ivanitsky L.A.

Optical-electronic correlation-extreme navigation system of small unmanned aerial vehicle.....30

Yudakov V. S., Sulim P.E.

An algorithm and a program for configuring risograph-ic printing, taking into account the printing properties of paper.....41

DATA PROCESSING AND DECISION-MAKING

Akulich S.V., Kolesneva I.P., Zhuk A.A.

The basic stages of imitating modelling and their realization in the decision-making support system.....47

Vishniakou U.A., Xia I.W.

IOT system architecture for the diagnosis of Parkinson's disease using neural networks and OSTIS.....52

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

SYSTEM ANALYSIS

KARASIK O.N., PRIHOZHYY A.A.

BLOCKED ALGORITHM OF FINDING ALL-PAIRS SHORTEST PATHS IN GRAPHS DIVIDED INTO WEAKLY CONNECTED CLUSTERS

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

The problem of finding all shortest paths between vertices in a graph (APSP) has real-life applications in planning, communication, economics and many other areas. APSP problem can be solved using various algorithms, starting from Floyd-Warshall's algorithm and ending with advanced, much faster blocked algorithms like Heterogeneous Blocked All-Pairs Shortest Path Algorithm designed to fully utilize underlying hardware resources and utilize inter-data relationships. In the paper, we propose a novel Blocked all-pairs Shortest Paths algorithm for Clustered Graphs (BSPCG) (in sequential and parallel forms) which utilizes the graph clustering information to significantly reduce the number of calculations by performing shortest paths search only through bridge vertices between clusters. We performed a set of comparing experiments for BSPCG and standard Blocked All-Pairs Shortest Path (BFW) algorithm on four randomly generated graphs of 4800 and 9600 vertices with different cluster configurations to determine the efficiency of calculation of paths passing through bridge vertices. All experiments were executed on a computer with two Intel Xeon E5-2620v4 processors (8 cores, 16 hardware threads and shared 20 MB L3 cache). In all the experiments the novel BSPCG algorithm outperformed the standard BFW algorithm. In single-threaded scenarios, BSPCG outperformed BFW up to 4.6 times on graphs of 4800 vertices and up to 2.7 times on graphs of 9600 vertices. In the multi-threaded scenarios, BSPCG also outperformed BFW up to 4.0 times on graphs of 4800 vertices and up to 2.7 times on graphs of 9600 vertices. The proposed algorithm can be used in scenarios where clustering information stays intact or slightly modified based on the changes in graph and can be reused for future calculation of all-pairs shortest paths in the graph.

Keywords: shortest paths algorithm, blocked algorithm, graph clustering, single-thread application, multi-threaded application, speedup

Introduction

The problem of finding shortest paths between vertices in a graph has multiple real-life applications. It is used to solve mazes, optimize traffic networks, to improve task planning, etc [1–3]. The problem can be formulated as to find shortest paths originated from one source (Single Source Shortest Path – SSSP) and to find shortest paths between all-pairs of vertices (All Pairs Shortest Path – APSP). Dijkstra's algorithm [4] is a classic solution to SSSP and Floyd-Warshall's algorithm [5] is a classic solution to APSP.

In context of the APSP problem, the Floyd-Warshall's algorithm demonstrate maximum efficiency when it is applied to dense or complete graphs and much less efficiency when it is applied to sparse graphs. The same rule applies to algorithm's modifications, which are primarily focused on improving memory usage and effective parallelization [6–9].

In our recent research [10–12] we started to focus on applicability of a Blocked Floyd-Warshall algorithm (BFW) to sparse graphs and on utilization of additional information about the graph to reduce the calculation time and resource consumption. In this paper, we focus on extension of the recently proposed Blocked Shortest Paths algorithm [11] with Unequally Sized blocks (BSPUS) using information about graph clustering to

significantly reduce the number of calculations on sparse graphs with weakly connected clusters.

APSP algorithms

Let a directed graph G consists of a set V of vertices (numbered $1 \dots N$) and a set E of edges with real edge-weights. A cost adjacency matrix D of size $N \times N$ represents G . It is initialized with weights of the edges in such a way, that element $D[i, j]$ is the weight of the edge between vertices i and j .

Floyd-Warshall's (FW) algorithm [5] iterates over the cost adjacency matrix D and checks existence of a path from vertex i to vertex j through existence of paths from i to k and from k to j (Figure 1). The algorithm always iterates over all the vertices and doesn't account for the density or structure of the graph.

Blocked Floyd-Warshall's (BFW) algorithm [8] operates on a matrix of blocks B which is created by dividing a matrix D into M equally sized blocks of size L in such a way that $M \cdot L = N$ (Figure 2).

The outer loop of BFW has M iterations. Each of them performs (Figure 3):

1. Calculation of "diagonal" block.
2. Calculation of "cross" blocks.
3. Calculation of "peripheral" blocks.

```

function FW() {
  for  $k \in \{1 \dots N\}$  {
    for  $i \in \{1 \dots N\}$  {
      for  $j \in \{1 \dots N\}$  {
         $D[i,j] = \min(D[i,j], D[i,k] + D[k,j])$ 
      }
    }
  }
}

```

Figure 1. Pseudocode of original Floyd-Warshall (FW) algorithm

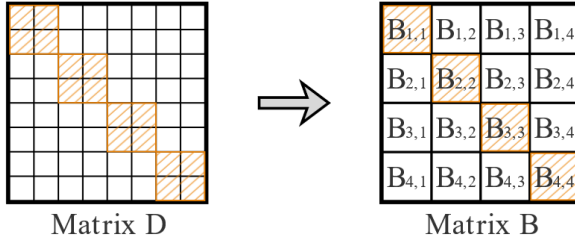


Figure 2. Visualization of matrix D being split into matrix of blocks B

All calculations are performed by a single procedure which accepts three input blocks at a time. The procedure calculates the paths between all vertices represented by block $B1$ passing through the vertices represented by $B2$ and $B3$ (Figure 4). In scope of one iteration, calculations have the following effect:

- In case of diagonal block, the procedure accepts the single diagonal block as $B1$, $B2$ and $B3$. This results in calculation of all shortest paths between pairs of vertices associated with the diagonal block.
- In case of cross blocks, the procedure accepts the diagonal block as $B3$ (vertical) or $B2$ (horizontal) and the cross block as $B1$ and $B2$ or $B1$ and $B3$ respectively. This results in a calculation of all shortest paths between all vertices of horizontal and vertical blocks of cross through vertices of the diagonal block.
- In case of peripheral blocks, the procedure accepts one peripheral and two cross blocks (vertical and horizontal) as $B1$, $B2$ and $B3$ respectively. This results in calculation of all shortest paths between pairs of vertices of peripheral block through vertices of diagonal block.

It should be noted that in each iteration BFW calculates the shortest paths between all vertices through vertices of the diagonal block.

Blocked all-pairs Shortest Paths algorithm with Unequally Sized blocks (BSPUS) was proposed in [11]; it generalizes the idea of *BFW* for graphs divided into unequally sized subgraphs. It extends the capabilities of existing blocked *APSP* algorithms and allows to solve the *APSP* problem on graphs that are partitioned into weakly connected dense clusters. The algorithm operates on a matrix U of blocks, which is created by dividing matrix D into M unequal blocks of sizes $S = \{S_1 \dots c\}$ in such a way that $S_1 + \dots + S_M = 1$. (Figure 5).

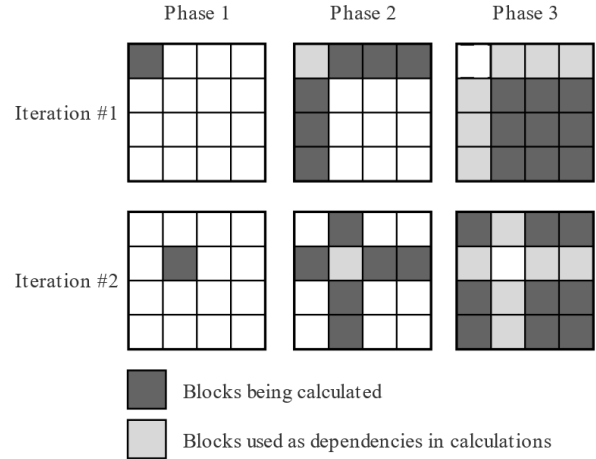


Figure 3. Visualization of two first iterations of Blocked Floyd-Warshall (BFW) algorithm

```

function BFW() {
  for  $m \in \{1 \dots M\}$  {
     $proc(B[m,m], B[m,m], B[m,m]);$ 
    for  $i \in \{1 \dots M\}$  and  $i \neq m$  {
       $proc(B[i,m], B[i,m], B[m,m]);$ 
       $proc(B[m,i], B[m,m], B[m,i]);$ 
    }
    for  $i \in \{1 \dots M\}$  and  $i \neq m$  {
      for  $j \in \{1 \dots M\}$  and  $j \neq m$  {
         $proc(B[i,j], B[i,m], B[m,j]);$ 
      }
    }
  }
}

```

```

function  $proc(B1, B2, B3)$  {
  for  $k \in \{1 \dots L\}$  {
    for  $i \in \{1 \dots L\}$  {
      for  $j \in \{1 \dots L\}$  {
         $B1[i,j] = \min(B1[i,j], B2[i,k] + B3[k,j])$ 
      }
    }
  }
}

```

Figure 4. Pseudocode of Blocked Floyd-Warshall (BFW) algorithm

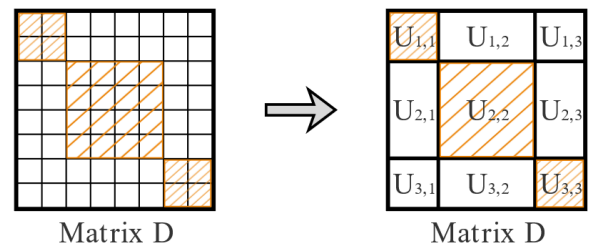


Figure 5. Illustration of matrix D being split into matrix U of blocks with unequal sizes

The block calculation procedure Figure 6 in *BSPUS* differs from those in *BFW* by considering the parameters such as height (the number of rows) and width (the number of columns) of blocks.

```

function proc(U1, U2, U3) {
  for k ∈ {1 ... height(U3)} {
    for i ∈ {1 ... height(U1)} {
      for j ∈ {1 ... width(U1)} {
        U1[i,j] = min(U1[i,j], U2[i,k] + U3[k,j])
      }
    }
  }
}

```

Figure 6. Pseudocodes of block calculation procedure in BSPUS

Analysis of algorithms. All presented algorithms have the same computational complexity – $O(N^3)$ and space complexity – $O(N^2)$. However, they have different performance and energy consumption characteristics [13–16]. *BFW* is more advanced than *FW* regarding both parameters because of the improved memory access pattern and spatial data locality. *BFW* also provides multiple opportunities for performance optimizations by using different calculation procedures for different blocks [7] and effective parallelization using blocks interdependencies [17].

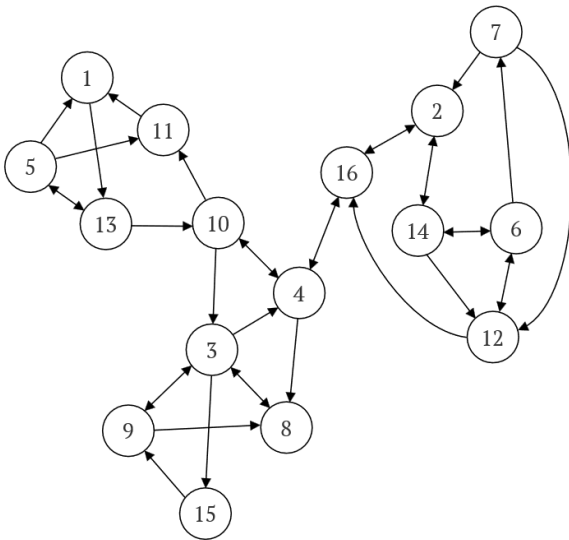


Figure 7. Example graph G of 16 vertices and 28 edges

In addition to benefits of *BFW*, the *BSPUS* provides an opportunity to adapt algorithms execution to the graph structure by splitting it into blocks based on the graph clusters [12]. In one of our previous works [10] we defined requirements for methods of graph clustering and demonstrated that existing, well-known graph clustering methods can fulfil these requirement given a sparse graph.

In this paper, we extend the application of graph clustering results to improve the methods of solving the all-pairs shortest path problem. We extend the *BSPUS* algorithm to a *Blocked all-pairs Shortest Paths algorithm for Clustered Graphs (BSPCG)*, which uses the graph clustering information to reduce the number of calculations significantly regarding sparse graphs.

Blocked all-pairs Shortest Paths algorithm for Clustered Graphs

Figure 7 shows a small example graph G of 16 vertices interconnected by 28 edges. Visually it is easy to spot (Figure 8) three highly interconnected clusters C_1 , C_2 and C_3 where:

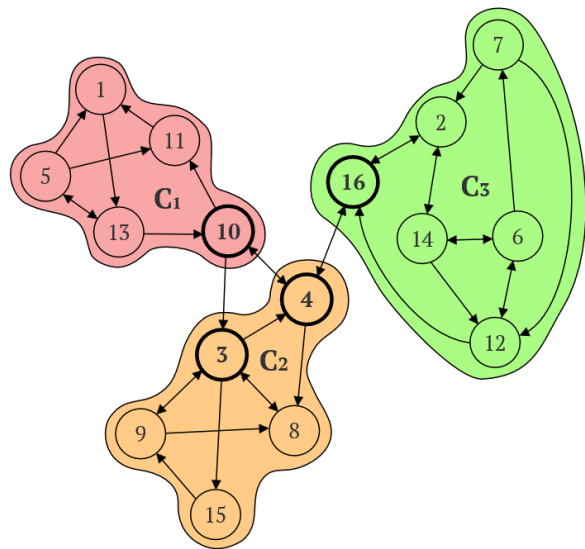


Figure 8. Example graph G split into three clusters C_1 (red), C_2 (orange) and C_3 (green) interconnected through 4 bridge vertices – 3, 4, 10 and 16 (in bold)

- C_1 includes vertices 1, 5, 10, 11 and 13.
- C_2 includes vertices 3, 4, 8, 9 and 15.
- C_3 includes vertices 2, 6, 7, 12 and 16.

These clusters are interconnected by 4 bridge vertices – 3, 4 (from C_2), 10 (from C_1) and 16 (from C_3), and 5 directed edges – $10 \rightarrow 3$, $4 \rightarrow 10$, $10 \rightarrow 4$, $4 \rightarrow 16$ and $16 \rightarrow 4$.

Looking at Figure 8 it can be observed that if we calculate all shortest paths from vertex 4 to all vertices of

cluster C_1 , then all these paths would lay straight through vertex 10 (which is a bridge vertex of C_1). Absolutely the same is true, if we would like to calculate all shortest paths from any vertices of C_2 or C_3 to vertices of C_1 . It remains true, if we calculate all shortest paths from vertices 1, 5, 11 or 13 into vertices of C_2 or C_3 . In context of the *FW*, *BFW* and *BSPUS* algorithms it means that when we calculate such paths we don't need to iterate over all vertices of the graph, instead, we only need to

iterate through cluster's bridge vertices – in our case, vertex 10.

However, before calculating a path to or from the cluster through its bridge vertices we must first calculate all shortest paths within the cluster.

The *BSPCG* algorithm utilizes the opportunity to use unequally sized blocks (provided by *BSPUS*) and iterative mechanics of the *BFW*, specifically the part where in every iteration the diagonal block is calculated first, which results into calculations of all shortest paths between its vertices.

The algorithm we propose is as follows:

1. Represent a graph as cost-adjacency matrix (Figure 9a).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0												1			
2		0												1		1
3			0	1				1	1						1	
4				0				1	1							1
5	1				0					1	1					
6					0	1					1	1				
7		1				0					1					
8			1				0									
9			1				1	0								
10			1	1						0	1					
11	1										0					
12						1					0					
13					1					1		0				
14		1				1					1		0			
15									1						0	
16		1		1												0

a

2. Rearrange its rows and columns to group clusters around matrix diagonal. Split the matrix into unequally sized blocks where clusters are diagonal blocks (Figure 9b).

3. Calculate vectors I of block relative indices of all bridge vertices for every diagonal block (Figure 10).

4. Calculate all-pairs shortest paths using *BSPCG* algorithm (Figure 11).

5. Rearrange rows and columns to return them to their original positions.

In step #2, the algorithm incorporates graph clusters into the matrix and makes it compatible with the iterative mechanics of the *BFW* and *BSPUS* algorithms (Figure 3).

	1	5	10	11	13	3	4	8	9	15	2	6	7	12	14	16
1	0				1											
5	1	0		1	1											
10			0	1		1	1									
11	1			0												
13		1	1		0											
3					0		1	1	1							
4			1			0	1									1
8					1		0									
9					1		1	0								
15								1	0							
2										0				1	1	
6											0		1	1	1	
7											1		0	1		
12												1		0		
14												1	1		1	0
16								1				1				0

b

Figure 9. Representation of example graph G with cost-adjacency matrix:

a) is original representations and b) is a cost-adjacency matrix where rows and columns are rearranged to group clusters across matrix diagonal, splitted into 9 unequally sized blocks (one diagonal block for each cluster)

In step #3, the algorithm transforms information about bridge vertices into the format compatible with the algorithm structure where k is not the vertex number in a graph but a block relative index of it.

v	1	5	10	11	13	3	4	8	9	15	2	6	7	12	14	16
0				1		0		1	1	1	0				1	1
1	0		1	1			0	1				0	1	1	1	
		0	1			1		0			1		0	1		
1			0			1		1	0			1		0		
	1	1		0					1	0	1	1		1	0	
											1					0

i			2			0	1									5
I	I_1					I_2					I_3					

Figure 10. Illustration of mapping diagonal block vertices (v) of graph G to their block relative indices (i) in index vector I

In step #5, the algorithm reverses the changes made in step #2 and returns the structure of the matrix to its initial state.

```

function BSPCG() {
  for  $m \in \{1 \dots M\}$  {
    proc( $B[m,m]$ ,  $B[m,m]$ ,  $B[m,m]$ );
    for  $i \in \{1 \dots M\}$  and  $i \neq m$  {
      proc_bridges( $B[i,m]$ ,  $B[i,m]$ ,  $B[m,m]$ ,  $I(m)$ );
      proc_bridges( $B[m,i]$ ,  $B[m,m]$ ,  $B[m,i]$ ,  $I(m)$ );
    }
    for  $i \in \{1 \dots M\}$  and  $i \neq m$  {
      for  $j \in \{1 \dots M\}$  and  $j \neq m$  {
        proc_bridges ( $B[i,j]$ ,  $B[i,m]$ ,  $B[m,j]$ ,  $I(m)$ );
      }
    }
  }
}

```

Figure 11. Pseudocode of *BSPCG* algorithm with two calculation procedures – proc to calculate diagonal blocks and proc_bridges to calculate cross and peripheral blocks

In terms of algorithmic complexity, *BSPCG* has the same space and worst-case time complexity as *FW*, *BFW* and *BSPUS*. However, it should be noticed that the number of computations in *BSPCG* depends on the number of bridge vertices between clusters and on the overall graph size. Therefore, in practical cases, the usage of *BSPCG* on sparse graphs can result in a significant speedup in computations.

Experiments

Environment. We implemented sequential and parallel versions of the *BFW* and *BSPCG* algorithms using C++ language. The parallel version was implemented using OpenMP v4.5. The source code was compiled by GNU GCC compiler v13.2.0 with auto-vectorization enabled.

Experiments were run on a computer with two Intel Xeon E5-2620v4 processors (8 cores, 16 hardware threads, L1 cache 32 KB, L2 cache 256 KB) with shared inclusive 20 MB L3 cache.

Graphs. We generated four random connected sparse graphs with predefined cluster configurations (Table 1).

The sizes of clusters in each of the experimental graphs have been varied in a certain range, and the share

of bridge vertices in the overall number of vertices was not high.

Table 1. Specification of experimental graphs that are randomly generated for a predefined number of clusters

Graph	1	2	3	4
Vertices	4800	4800	9600	9600
Edges	288245	153858	644198	326779
Clusters	20	41	40	80
Bridge vertices	567	620	3452	3550
Bridge edges	621	687	2374	2505

We intentionally generated pairs of graphs split into different number of clusters but with close number of bridge vertices to evaluate the influence of our above formulated assumption on the *BSPCG* complexity.

Configuration. In all experiments we set block size of *BFW* algorithm to 120×120. This size was found to give the best results on the selected experimental system [13]. In *BSPCG* the sizes of the blocks were derived from the sizes of the clusters.

Results. We performed a set of experiments, each repeated at least five times. The standard deviation of the running time has not exceeded the 0.8 % mark. All results for single- and multi-threaded implementations are presented in Table 2.

Table 2. Experimental results of single and multi-threaded implementations of the *BFW* and *BSPCG* algorithms on 4 experimental graphs of 4800 and 9600 vertices. Time is presented in seconds (s)

Graph	4800		9600		4800		9600	
Clusters	20	40	40	80	20	40	40	80
Type	Single Thread				Multi-Threaded			
BFW	38.1	38.4	305.4	305.1	3.2	3.2	25.1	25.1
BSPCG	8.2	8.7	110.5	115.6	0.8	1.0	9.1	10.4

In the single-thread implementation, *BSPCG* outperforms *BFW* by 4.4 to 4.6 times on the graphs of 4800 vertices and by 2.6 to 2.7 times on the graphs of 9600 vertices. In the multi-threaded implementation, *BSPCG* outperforms *BFW* by 3.2 to 4 times on the graphs of 4800 vertices and by 2.4 to 2.7 times on the graphs of 9600 vertices.

We can observe from the Table 2 that the execution time of *BFW* doesn't depend on the number or clusters, nor the number of bridge vertices, nor the overall number of edges and, in general, isn't affected by graph structure but only by the size of the graph. Regarding *BSPCG*, it is easy to see that the execution time depends on both the graph size and the bridge vertex count.

Analysis. One of the potential disadvantages of *BSPCG* is the time required to retrieve graph

clustering information. The potential impact of this depends on the algorithm used to calculate graph clustering information and can be nullified if such information exists prior to the execution.

The major advantage of the algorithm is its ability to reuse the same clustering information to recalculate shortest paths in the same graph but with different edge weights (a scenario for an optimization problem). Besides reusing the same clustering information, it is also applicable in scenarios when incremental changes are made to the graph (eviction or addition of the edge) which can be reflected on the previously collected clustering information which then can be used to recalculate shortest paths.

Conclusion

In this paper we have presented a novel Blocked all-pairs Shortest Paths algorithm for Clustered Graphs (*BSPCG*) which can efficiently utilize information of graph clustering and significantly speedup the computation of all-pairs shortest paths in large sparse graphs. We implemented the *BFW* and *BSPCG* algorithms in single- and multi-threaded scenarios. We performed a set of experiments

using four randomly generated sparse graphs of different sizes and different cluster configurations where the *BSPCG* algorithm outperformed the *BFW* algorithm on all experimental graphs by 2.4 to 4.6 times in both scenarios. The *BSPCG* algorithm opens a possibility for two potential use cases where clustering information is not recalculated each time before the calculation of shortest paths but instead is either maintained or slightly modified based on changes in the graph.

REFERENCES

1. **Schrijver A.** On the history of the shortest path problem. *Documenta Mathematica*. 2012. Vol. 17, № 1. P. 155–167.
2. **Anu P., (Kumar) M.G.** Finding All-Pairs Shortest Path for a Large-Scale Transportation Network Using Parallel Floyd-Warshall and Parallel Dijkstra Algorithms. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2013. Vol. 27, № 3. P. 263–273.
3. **Ridi L., Torrini J., Vicario E.** Developing a Scheduler with Difference-Bound Matrices and the Floyd-Warshall Algorithm. *IEEE Software*. 2012. Vol. 29, № 1. P. 76–83.
4. **E.W. Dijkstra.** A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*. 1959. Vol. 1, № 1. P. 269–271.
5. **Floyd R.W.** Algorithm 97: Shortest Path. *Communications of the ACM*. 1962. Vol. 5, № 6. P. 345–.
6. **Prihozhy A., Karasik O.** Inference of shortest path algorithms with spatial and temporal locality for Big Data processing. *Proceedings VIII International conference “Big data and advanced analytics”*, Minsk: Bestprint, 2022. P. 56–66.
7. **Prihozhy A., Karasik O.** Heterogenous blocked all-pairs shortest paths algorithm. *System analysis and Applied Information Science*. 2017. № 3. P. 68–75.
8. **Venkataraman G., Sahni S., Mukhopadhyaya S.** A Blocked All-Pairs Shortest Paths Algorithm. *Journal of Experimental Algorithmics (JEA)*. 2003. Vol. 8. P. 857–874.
9. **Singh A., Mishra P.K.** Performance Analysis of Floyd Warshall Algorithm vs Rectangular Algorithm. *International Journal of Computer Applications*. 2014. Vol. 107, № 16. P. 23–27.
10. **Karasik O., Prihozhy A.** Requirements to methods of graph clustering at the aim of solving the shortest path problem. *Proceedings X International conference “Big data and advanced analytics”*, Minsk: BSUIR, 2024. P. 272–279.
11. **Prihozhy A., Karasik O.** New blocked all-pairs shortest paths algorithms operating on blocks of unequal sizes. *System analysis and applied information science*. BNTU, 2023. № 4. P. 4–13.
12. **Prihozhy A., Karasik O.** Blocked algorithm of shortest paths search in sparse graphs partitioned into unequally sized clusters. *Proceedings X International conference “Big data and advanced analytics”*, Minsk: BSUIR, 2024. P. 262–271.
13. **Karasik O., Prihozhy A.** Tuning block-parallel all-pairs shortest path algorithm for efficient multi-core implementation. *System analysis and applied information science*. BNTU, 2022. № 3. P. 57–65.
14. **Karasik O., Prihozhy A.** Parallel blocked all-pair shortest path algorithm: block size effect on cache operation in multi-core system. *Proceedings VIII International conference “Big data and advanced analytics”*, Minsk: Bestprint, 2022. P. 28–38.
15. **Prihozhy A., Karasik O.** Influence of shortest path algorithms on energy consumption of multi-core processors. *System analysis and applied information science*. BNTU, 2023. № 2. P. 4–12.
16. **Karasik O., Prihozhy A.** Profiling of energy consumption by algorithms of shortest paths search in large dense graphs. *Proceedings IX International conference “Big data and advanced analytics”*, Minsk: BSUIR, 2023. P. 44–50.
17. **Karasik O., Prihozhy A.** Streaming block-parallel algorithm for finding shortest paths on a graph. Minsk: BSUIR 2018. № 2. P. 77–84.

КАРАСИК О.Н., ПРИХОЖИЙ А.А.

БЛОЧНЫЙ АЛГОРИТМ ПОИСКА КРАТЧАЙШИХ ПУТЕЙ МЕЖДУ ВСЕМИ ПАРАМИ ВЕРШИН В ГРАФАХ СО СЛАБО-СВЯЗАННЫМИ КЛАСТЕРАМИ

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Задача поиска кратчайших путей между всеми парами вершин в графе (APSP) имеет применение в планировании, коммуникациях, экономике и многих других сферах. На сегодняшний день существует ряд алгоритмов решения APSP задач, начиная с алгоритма Флойда-Уоршелла (Floyd-Warshall) и заканчивая более продвинутыми и быстрыми блочными алгоритмами (например, неоднородным блочным алгоритмом поиска кратчайших путей - *Heterogeneous Blocked All-Pairs Shortest Paths*), предназначенными для максимально эффективного использования вычислительных средств и зависимостей между данными, участвующими в вычислениях. В статье предлагается новый блочный алгоритм BSPCG поиска кратчайших путей в кластеризованных графах в однопоточном и многопоточном вариантах, который использует информацию о кластеризации для сокращения объема вычислений посредством поиска кратчайших путей, проходящих через граничные вершины кластеров. В статье проведена серия вычислительных экспериментов над стандартным блочным алгоритмом BFW и новым алгоритмом BSPCG с целью доказательства эффективности поиска кратчайших путей в случае использования граничных вершин кластеров. Эксперименты выполнялись с использованием графов размером 4800 и 9600 вершин с различными кластерными конфигурациями. Эксперименты проведены на компьютере с двумя процессорами Intel Xeon E5-2620v4 (каждый процессор включает 8 физических ядер и 16 аппаратных потоков, а также кэш L3 объемом 20 МБ). Во всех проведенных экспериментах новый алгоритм BSPCG превзошел стандартный алгоритм BFW в несколько раз. В однопоточных сценариях BSPCG продемонстрировал ускорение по сравнению с BFW до 4.6 раз на графах с 4800 вершинами и до 2.7 раз на графах с 9600 вершинами. В многопоточных сценариях BSPCG также продемонстрировал ускорение до 4 раз на графах с 4800 вершинами и до 2,7 раз на графах с 9600 вершинами. Предложенный в статье алгоритм может быть использован в сценариях, где информация о кластеризации остается неизменной или изменяется незначительно и может быть повторно использована для множественных находжений всех кратчайших путей в графе.

Ключевые слова: поиск кратчайших путей на графе, блочный алгоритм, кластеризация графа, однопоточное приложение, многопоточное приложение, производительность



Karasik Oleg is a Technology Lead at ISsoft Solutions (part of Coherent Solutions) in Minsk, Belarus, and PhD in Technical Science. His research interests include parallel multithreaded applications and the parallelization for multicore and multiprocessor systems.

Карасик О.Н., ведущий инженер иностранного производственного унитарного предприятия «ИССОФТ СОЛЮШЕНЗ» (часть Coherent Solutions), г. Минск, Беларусь, к.т.н. (2019). В сферу его научных интересов входят параллельные многопоточные приложения и распараллеливание для многоядерных и многопроцессорных систем.

E-mail: karasik.oleg.nikolaevich@gmail.com



Anatoly Prihozhy is full professor at Computer and system software department of Belarus 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.

А.А. Прихожий, профессор кафедры «Программное обеспечение информационных систем и технологий» Белорусского национального технического университета, д.т.н. (1999), диплом профессора (2001). В сферу его научных интересов входят языки программирования и описания аппаратуры, распараллеливающие компиляторы, методы и средства автоматизированного проектирования программных и аппаратных средств на логическом, высоком и системном уровнях, а также не полностью определенных логических систем. Имеет более 300 публикаций в Восточной и Западной Европе, США и Канаде. Его работы опубликованы в таких мировых издательствах, как IEEE, Springer, Kluwer Academic Publishers, World Scientific и других.

E-mail: prihozhy@bntu.by

АСАДОВ ХИКМЕТ ГАМИД ОГЛЫ, АБИЛОВА НАРГИЗ ШАМИЛ ГЫЗЫ, НУРИЕВА ЛАЛЕ ИМРАН ГЫЗЫ

МЕТОД СТРУКТУРНО-БЛОЧНОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Национальное Аэрокосмическое Агентство
г. Баку, Азербайджанская Республика

В статье предлагается подход к решению задачи синтеза систем дистанционного зондирования. Высказывается мнение о том, что системы дистанционного зондирования, составляющие особый подкласс измерительных систем должны быть оптимизированы согласно принципам и положениям теории анализа измерительных систем. Эта теория, являющаяся ветвью общей теории систем, применима к задачам анализа и синтеза систем дистанционного зондирования. Разработана обобщенная методика анализа и оптимизации систем дистанционного зондирования. В качестве примера сформулирована и решена задача анализа оптимизации и синтеза системы дистанционного зондирования морской поверхности.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, синтез, измерительные системы, оптимизация, морская поверхность

Введение

Хорошо известно, что одним из основных принципов системного анализа является оптимизация и синтез наилучшего варианта построения системы на базе разработанной общей модели рассматриваемого объекта [1]. Моделирование функционирования какой-либо системы в первую очередь предполагает определение основных общих показателей, которые характеризуют все элементы множества подобных систем. Если речь идет о системном анализе измерительных систем, то можно говорить о множестве подобных измерительных систем образующих некоторый подкласс систем. Ветвь теории систем, изучающая закономерности приложения этой теории ко всем подклассам измерительных систем в научной литературе обозначена как «Анализ измерительных систем (АИС)» [2-5]. Согласно [2], АИС является экспериментальным и математическим методом определения степени влияния изменений в пределах измерительного процесса на общую изменчивость всего процесса. АИС также определяет способность измерительной системы генерировать точные данные и адекватность достигаемой точности для достижения поставленной цели. АИС обеспечивает измерение пяти параметров: смещаемость результатов, стабильность, воспроизводимость, линейность и надежность. В работе [3] отмечается что качество полученных измерительных данных определяется степенью стабильности условий в пределах которых осуществляются измерения. Если окружающая среда и измерительная система находятся во взаимодействии, то результат проведенных измерений невысок.

Согласно [4], АИС является средством используемым для идентификации и количественной оценки различных компонентов суммарных изменений

в пределах рассматриваемой измерительной системы. Согласно [4], целью исследований по АИС является всесторонняя валидация качества данных, выдаваемых измерительной системой (с учетом влияния таких факторов как измерительная прибор, процедура измерений, окружающая среда и сам оператор) и оценка возможностей, работоспособности и неопределенности генерируемой измерительной системой по видам измерений. Согласно [5], общая изменчивость σ_0 (variability) полученных измерительных данных является суммой изменчивости самого измеряемого процесса σ_1 и изменчивостью характеристик самой измерительной системы σ_2 , т. е.

$$\sigma_0^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2. \quad (1)$$

При этом:

$$\sigma_2^2 = \sigma_3^2 + \sigma_4^2, \quad (2)$$

где σ_3 – погрешность из-за низкой повторяемости; σ_4 – погрешность из-за низкой воспроизводимости.

Таким образом, если учесть, что АИС был охарактеризован в качестве важного требования в стандарте качества QS9000, а также в ISO TS16949:2009, а также то, что в АИС нестабильность самого изучаемого объекта или процесса четко отделены от неопределенностей, вызванных самой измерительной системой, то методологию АИС можно считать вполне пригодной для применения к системам дистанционного зондирования если обобщенным объектом измерения считать сумму самого объекта и влияние внешних факторов, воздействующих на этот объект, приводящих как систематическим, так и случайным погрешностям измерений. Так, например, в работе [6] отмечается, что системы дистанционного зондирования состоят из трех основных подсистем:

(1) подсистема изучаемой сцены (объекта); (2) подсистема, образованная самим сенсором, осуществляющим измерения; (3) подсистема, осуществляющая обработку данных.

В работе [6] представлена таксономия воздействующих эффектов в графическом виде применительно к системам дистанционного зондирования (рис. 1).



Рисунок 1. Таксономия факторов, влияющих на изменчивость информационного содержания полученных измерительных данных

Как отмечается в работе [6], для улучшения общего понимания всего зондируемого процесса или объекта, система зондирования должна быть разделена на отдельные идентифицируемые части и далее, учитывая возможный синергизм от комбинаций моделей может быть построена общая модель системы.

С учетом вышеизложенного в настоящей работе сделано попытка построения общей структурно-блочной модели системы дистанционного зондирования.

Материалы и методы

Введем на рассмотрение функционал качества системы дистанционного зондирования, F_0 неявно зависящий от измеряемого параметра y и фактора x , влияющего на y в виде

$$F_1 = \int_0^{x_{\max}} F(x, y(x)) dx. \quad (3)$$

При этом (3) является базовой математической моделью некоторого подкласса систем дистанционного зондирования, качество работы которых

может быть характеризовано этим выражением. Целью проводимого синтеза оптимальной системы является определение оптимальной функции $y(x)_{opt}$ при которой F_1 достиг бы экстремального значения. Для решения данной задачи несколько сузим класс непрерывных и дважды дифференцируемых функций до некоторого подкласса, таких же функций, удовлетворяющих условию:

$$F_2 = \int_0^{x_{\max}} y(x) dx = C; \quad C = \text{const}. \quad (4)$$

Таким образом, поиск $y(x)_{opt}$ будем осуществлять в подклассе функций, удовлетворяющих ограничительному условию (4). С учетом (3) и (4) составим задачу Лагранжа, по схеме:

$$F_0 = F_1 + \lambda F_2. \quad (5)$$

С учетом (3), (4), (5) получим:

$$F_0 = \int_0^{x_{\max}} F(x, y(x)) dx + \lambda \left[\int_0^{x_{\max}} y(x) dx - C \right]. \quad (6)$$

Решение задачи (6) согласно методу Эйлера-Лагранжа должна удовлетворять условию [7]:

$$\frac{d\{F(x, y(x)) + \lambda y(x)\}}{dy(x)} = 0. \quad (7)$$

Таким образом, зная конкретный вид функционала $F(x, y(x))$ можно определить оптимальную функцию $y(x)_{opt}$ и тем самым синтезировать оптимальный вариант системы дистанционного зондирования.

Рассмотрим конкретный вариант синтеза оптимальной системы зондирования на примере оптических радиационных измерений применительно к морской поверхности.

Согласно работе [8], отраженный оптический сигнал R с поверхности моря в конкретном рассматриваемом случае определяется как:

$$R = A - B \cdot \rho(w), \quad (8)$$

где A и B – радиационные потоки, характеризующие конкретные условия проводимого измерительного эксперимента; w – скорость ветра; $\rho(w)$ – коэффициент отражения поверхности моря.

Согласно [9] имеет место следующее регрессионное соотношение между w и $\rho(w)$:

$$\rho(w) = 0,0256 + 0,00039w + 0,000034w^2. \quad (9)$$

Что касается зависимости между высотой морских волн h и w , то согласно [10] существует следующая регрессионная зависимость:

$$h = 0,08w^2 - 0,17w + 0,48; \quad R^2 = 0,82. \quad (10)$$

Вместе с тем, известны и другие виды функциональной взаимосвязи [9], в частности, линейная взаимосвязь между h и w . С учетом вышесказанного задачу оптимизации и последующего синтеза сформулируем следующим образом. Следует определить такой вид взаимосвязи $w = w(h)$, при котором R мог бы достигнуть экстремума. С учетом (7)-(10) подынтегральную функцию целевого функционала представим в сепарабельном виде:

$$F = \int_0^{h_{\max}} [A - B(0,025 + 0,00039w(h) + 0,000034w^2(h))] h dh. \quad (11)$$

Для вычисления $w = (h)_{opt}$ наложим на эту функцию следующее интегральное ограничение:

$$\int_0^{h_{\max}} w(h) dh = C_1; \quad C_1 = \text{const}. \quad (12)$$

С учетом (11) и (12) составим следующий целевой функционал F_0 :

$$F_0 = \int_0^{h_{\max}} [A - B(0,025 + 0,00039w(h) + 0,000034w^2(h))] h dh + \lambda \left[\int_0^{h_{\max}} w(h) dh - C_1 \right]. \quad (13)$$

Решение оптимизационной задачи (13) согласно методу Эйлера и Лагранжа должна удовлетворять условию:

$$\frac{d \left\{ -[0,00039w(h) + 0,000034w^2(h)] h + \lambda w(h) \right\}}{dw(h)} = 0. \quad (14)$$

Из (14) получаем:

$$\left[-0,00039 + 0,000034w(h) \right] h + \lambda = 0. \quad (15)$$

Из (15) находим:

$$w(h) = -\frac{0,00039h + \lambda}{0,000034h}. \quad (16)$$

С учетом (12) и (16) получим:

$$\int_{h_{\min}}^{h_{\max}} \left[-\frac{0,00039h + \lambda}{0,000034h} \right] dh = C_1. \quad (17)$$

Из (17) имеем:

$$(h_{\max} - h_{\min}) a_1 + a_2 \lambda \ln \left(\frac{h_{\max}}{h_{\min}} \right) = C_1, \quad (18)$$

$$\text{где } a_1 = -\frac{0,00039}{0,000034}; \quad a_2 = -\frac{1}{0,000034}.$$

Из (18) находим:

$$\lambda = \frac{(C_1 - (h_{\max} - h_{\min}) a_1)}{a_2 \ln \left(\frac{h_{\max}}{h_{\min}} \right)}. \quad (19)$$

Учитывая (17) в (16) запишем:

$$w(h) = \frac{0,00039h + \frac{(C_1 - (h_{\max} - h_{\min}) a_1)}{a_2 \ln \left(\frac{h_{\max}}{h_{\min}} \right)}}{0,000034h} = a_1 - \frac{C + (h_{\max} - h_{\min}) |a_1|}{h \ln \left(\frac{h_{\max}}{h_{\min}} \right)}. \quad (20)$$

Очевидно, что при решении (20) F_0 достигает максимума, т. к. вторая производная подынтегрального выражения в (13) по искомой функции является отрицательной величиной.

Обсуждение

Таким образом рассмотренная система дистанционного зондирования морской поверхности может быть представлена в виде блок-схемы, включающей внешний излучатель, объект исследования (морская поверхность), воздействующий фактор (высота волн); воздействующий фактор (скорость ветра) (рисунок 2).

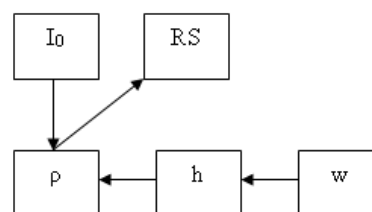


Рисунок 2. Блочное представление оптимизированной системы дистанционного зондирования морской поверхности. Принятые обозначения:
 I_0 – внешнее излучение; ρ – коэффициент отражения;
 h – высота волн; w – скорость ветра;
 RS – система зондирования

Таким образом, системный подход к анализу системы дистанционного зондирования морской

поверхности и дальнейший синтез оптимальной модели, обеспечивает формирование максимальной величины отраженного сигнала путем определения оптимальных взаимосвязей в системе.

Заключение

Показано, что элементы теории анализа измерительных систем, являющейся ветвью

общей теории систем, могут быть применены к системам дистанционного зондирования. Разработана обобщенная методика анализа и оптимизации систем дистанционного зондирования. В качестве примера сформулирована и решена задача анализа оптимизации и синтеза системы дистанционного зондирования морской поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спицина, И.А. С40 Системный анализ и моделирование информационных систем : учеб. пособие / И.А. Спицина, К.А. Аксенов; М во науки и высшего образования РФ. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. – 118 с.
2. **Measurement system analysis (MSA):** <https://lssimplified.com/measurement-system-analysis-msa-overview/>
3. **Measurement system analysis (MSA):** Fourth edition. <https://otc.com.my/main-course/measurement-system-analysis-msa-4th-edition/>
4. **Measurement system analysis guideline:** <https://sixsigmastudyguide.com/measurement-systems-analysis/>
5. **Montgomery D.C.** Statistical quality control: a modern introduction// 6th ed. New York. 2009.
6. **Kerekes J.P., Landgrebe D.A.** Modeling, simulation and analysis of optical remote sensing systems// School of electrical engineering purdue university.
7. **Эльсгольц Л.Э.** Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М. Наука. – 1974. – С. 432.
8. **Zibordi G., Ruddick K., Ansko I., Moore G., Kratzer S., Icely J., Reinart A.** In situ determination of the remote sensing reflectance: an inter-comparison// Ocean Sci. 8. 567-586. 2012.
9. **Ruddick K., De Cauwer V., Park Y., Moore G.** Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance – the similarity spectrum for turbid waters. – Limnol. Oceanogr. 51. 1167-1179. 2006.

**УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ**

**MANAGEMENT
OF TECHNICAL
OBJECTS**

ИНЮТИН А.В.¹, ЛУКАШЕВИЧ М.М.^{1,2}

ДЕТЕКЦИЯ ДЕФЕКТОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ НА ОСНОВЕ АРХИТЕКТУРЫ YOLOv8

¹Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси,

²Белорусский государственный университет

г. Минск, Республика Беларусь

Рассмотрены ключевые факторы и тенденции в проектировании и производстве печатных плат, определяющие современное состояние в области автоматического контроля печатных плат. Для поиска и классификации дефектов предлагается использовать метод детекции дефектов на изображениях на основе семейства моделей обнаружения объектов YOLO. Проведено обучение модели на публичном наборе изображений печатных плат с 6 классами дефектов, выполнена оценка точности на общепринятых метриках. На тестовом наборе данных средняя точность согласно метрике mAP50 равна 0,98.

Ключевые слова: дефект, печатные платы, детекция, классификация, нейронные сети

Введение

Существует несколько ключевых факторов, стимулирующих мировой рынок печатных плат в настоящее время и в течение следующих 5 лет [1–2]:

- развертывание беспроводных сетей 5G, источников возобновляемой энергии, таких как солнечные фотоэлектрические системы и ветряных турбин, дата-центров с высокопроизводительными серверами и коммутаторами для облачных вычислений;
- разработка приборов, машин и устройств Интернета вещей, электромобилей;
- внедрение усовершенствованных систем помощи водителю (ADAS, Advanced Driver Assistance Systems);
- производство современной техники и систем связи для нужд военных ведомств, аэрокосмической промышленности, медицины.

В настоящее время применяются различные технологические процессы изготовления печатных плат, каждый из которых состоит из нескольких этапов. Контроль качества при производстве печатных плат является обязательным, т. к. регулирует технологический процесс производства и определяет надежность работы радиоэлектронного оборудования, себестоимость его выпуска и сопровождения. На основании данных контроля технолог принимает решение о соответствии качества платы необходимым требованиям, необходимости внесении правок в фотошаблон или в технологический процесс. Поиск дефектов может осуществляться неоднократно в технологическом цикле, после некоторых этапов найденные дефекты можно исправить. Дефекты печатных плат можно разделить на дефекты металлизации, дефекты изоляционного материала, дефекты проводящего рисунка, дефекты финишных покрытий.

Современное производство печатных плат использует контактные, оптические, рентгеновские методы контроля [3–4]. Системы, основанные на контактных методах, касаются щупами контактных площадок и проверяют соответствие электрических связей между ними. В результате обнаруживаются такие важные дефекты как обрыв (open) и короткое замыкание (short). С помощью контактного метода принципиально не могут быть найдены такие дефекты как островки меди (spurious copper), выступы (spur) и вырывы (mouse bite) на дорожках, проколы (pinhole), отклонения минимальной ширины проводника (conductor too thin) и расстояния между проводниками (conductor too close). Увеличение сложности печатной платы приводит к значительному усложнению контроля. Рентгеновское излучение может определять пустоты под проводящим материалом и непропаи, имеет ограничения в применении из-за вредности для здоровья человека. Использование оптических методов контроля позволяет находить дефекты по признакам внешнего вида, является безопасным и дешевым.

В настоящее время за рубежом выпускаются автоматизированные системы контроля качества ПП. Ведущими производителями сегодня являются компании – Cognex Corporation, Gardien Services Inc., Manncorp Inc., Nordson YESTECH Inc., Omron Electronics LLC, Vision Engineering Inc, ViTrox Corp Bhd и Ibidem.

Актуальность задачи поиска дефектов печатных плат обусловлена следующими тенденциями в проектировании и производстве печатных плат [1]:

- использованием соединений высокой плотности;
- сочетание гибких схем и жестких секций на одной печатной плате;

- растягивающиеся схемы, основанные на новых проводящих материалах и методах изготовления;
- высокотермостойкие керамические печатные платы, которые могут работать в условиях агрессивной среды в оборонных, аэрокосмических и автомобильных системах;
- печатные платы с изолированной металлической подложкой для эффективного отвода тепла от мощных компонентов;
- встроенные пассивные элементы внутри печатной платы;
- аддитивная струйная или аэрозольная печать проводников;
- интеграция искусственного интеллекта и машинного обучения для обнаружения дефектов и внедрение принципов Индустрии 4.0 для анализа данных, спрос на высокоскоростной и точный контроль.

Анализ подходов к детекции объектов

В последние годы наблюдается значительный рост интереса к задачам видеоаналитики в целом. В рамках видеоаналитики можно выделить следующие решаемые задачи компьютерного зрения: локализация объектов на видео и изображениях и распознавание объектов на видео и изображениях. Под распознаванием принято понимать классификация объектов, а в случае локализации помимо распознавания определяется местоположение объектов на видео и изображениях. Данные задачи встречаются при работе с различными классами изображений, в том числе с медицинскими изображениями, снимками земной поверхности. В случае локализации объектов определяются координаты рамки, ограничивающей объект.

При решении задач компьютерного зрения классическими методами реализуется три этапа: предварительная обработка изображений/видео, извлечение признаков и принятие решений. Однако в последние годы лидирующие позиции стали занимать нейросетевые методы, основанные на глубоком обучении, которые отличаются тем, что часть слоёв нейронной сети (свёрточные слои) извлекает признаки, описывающие изображение, а вторая часть нейронной сети (полносвязные слои) принимает решение о принадлежности объектов на изображении тому или иному классу. Также в выходных слоях решается задача определения координат объектов на изображении.

За несколько десятилетий учёными было предложено большое количество подходов и методов детекции объектов. Ранние исследования описывают классические методы детекции объектов, включающие метод пороговой обработки, метод фильтрации признаков и метод каскадных классификаторов. Однако на современном этапе развития технологий компьютерного зрения всё более широко используются нейронные сети в целом и глубокое обучение в частности.

К числу основных методов детекции объектов относятся так называемые двухстадийные (R-CNN [5], Fast R-CNN [6], Faster R-CNN [7]) и одностадийные детекторы (SSD, YOLO [8–10]).

Двухстадийные детекторы решают задачу детекции в два этапа. В начале выполняется поиск перспективных регионов изображения, которые могут содержать объекты интереса. На втором этапе отобранные регионы классифицируются и определяется их точные координаты на изображении. Координатами объектов фактически являются координаты ограничивающих рамок.

Данное семейство алгоритмов имеет определённые ограничения с точки зрения времени работы, но имеет хорошую точность. В случае, когда важна скорость работы детектора, целесообразно использовать одностадийные детекторы, отличающиеся тем, что они позволяют одновременно определять координаты ограничивающих рамок и классифицировать объекты на изображении. Одностадийные детекторы работают быстрее двухстадийных, и в силу этого преимущества был выбран указанный подход для решения прикладной задачи детекции и классификации дефектов печатных плат.

Архитектура YOLOv8 [11] является одной из последних в серии детектор объектов в реальном времени YOLO и отличается высокими характеристиками в плане точности и скорости.

Набор изображений для экспериментов

Для проведения экспериментов был выбран публичный набор изображений DeepPCB [12], содержащий изображения дефектов печатных плат 6 классов. Набор данных содержит 1 500 пар изображений, каждая из которых состоит из эталонного изображения без дефектов и выровненного тестируемого изображения с аннотациями, включающими позиции 6 наиболее распространенных типов дефектов печатных плат: обрыв, короткое замыкание, выступ, вырыв, прокол и островок.

Все изображения в этом наборе данных получены с помощью ПЗС-матрицы с линейным сканированием и разрешением около 48 пикселей на 1 миллиметр. Исходный размер эталона и тестируемого изображения составляет около 16k×16k пикселей. Затем изображения разделены на множество подизображений размером 640×640 пикселей и выравнены с помощью техники совмещения изображений. Составителями набора реализована бинаризация с выбранным порогом. Пример изображения и соответствующего ему эталона приведен на рисунке 1.

Для проведения экспериментов нами использован указанный набор данных уже с применёнными к нему техниками аугментации [13], которые включают следующие операции:

- вертикальный и горизонтальный поворот;

- поворот на 90° по часовой стрелке, против часовой стрелки и вверх ногами;
- обрезка изображения с минимальным масштабированием 0 % и максимальным масштабированием 20 %;
- поворот между -15° и $+15^\circ$;
- сдвиг: $\pm 15^\circ$ по горизонтали; $\pm 15^\circ$ по вертикали.

После аугментации набор разделен на обучающую, валидационную и тестовую выборки, которые

включают в себя 3 150, 150 и 300 изображений соответственно. Для каждого изображения есть файл разметки в формате .txt, который содержит информацию о дефектах на изображении (номер класса и нормированные координаты ограничивающего прямоугольника). Следует обозначить, что на одном изображении может присутствовать несколько дефектов, в том числе разных классов. Дефекты в наборе распределены следующим образом (рисунок 2).

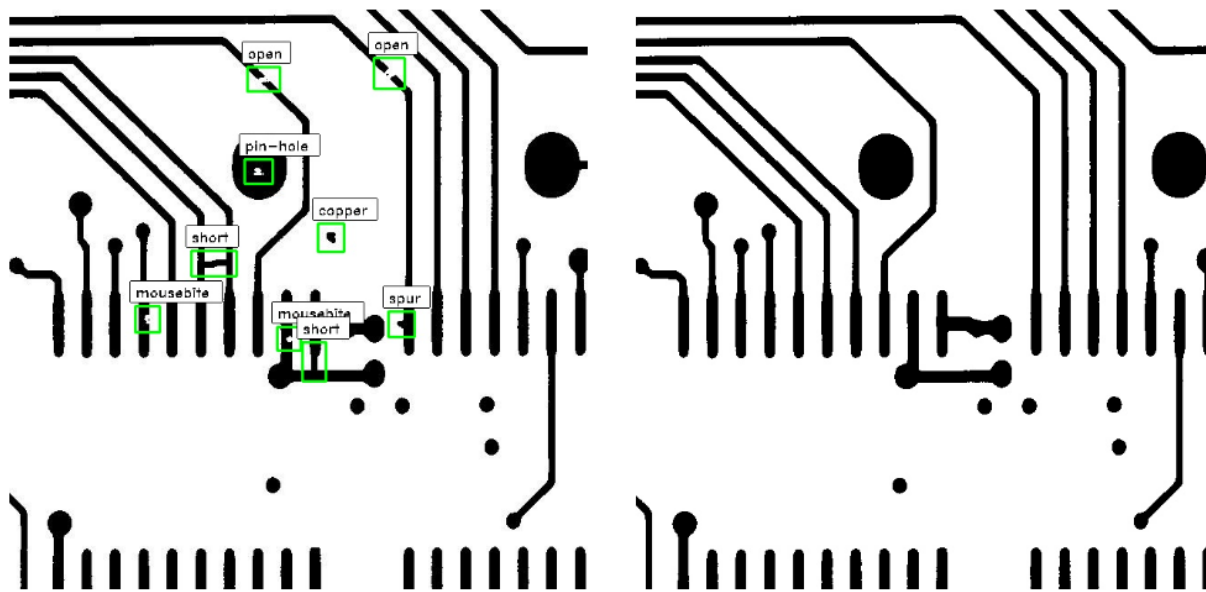


Рисунок 1. Пример изображения и соответствующего ему эталона из набора данных DeepPCB

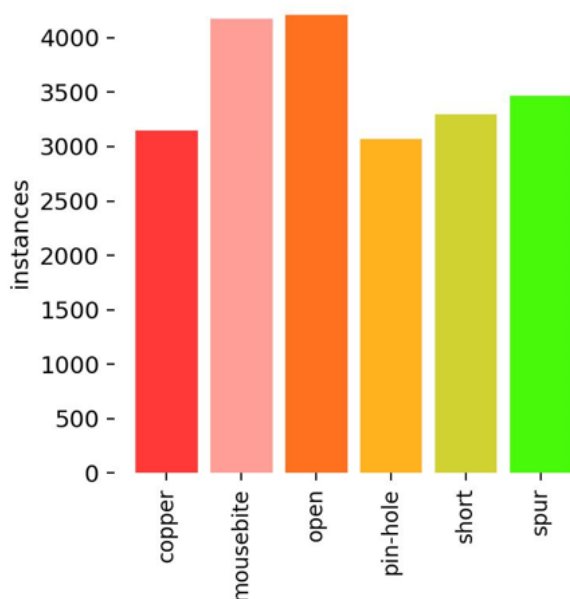


Рисунок 2. Распределение дефектов в наборе данных

Оценка точности детекции

Для оценки точности модели использованы общепринятые метрики, основанные на значениях верно классифицированных положительных объектов (TP); верно классифицированных отрицательных объектов (TN); отрицательных примерах, классифицированных как положительные объекты (FP); положительные примеры, классифицированные как отрицательные объекты (FN). На основе указанных значений строится матрица ошибок. Матрица ошибок для случая бинарной классификации приведена на рисунке 3. В таблице 1 представлены метрики для оценки точности детекции объектов.

Категория i		Экспертная оценка	
		Положительная	Отрицательная
Оценка системы	Положительная	TP	FP
	Отрицательная	FN	TN

Рисунок 3. Матрица ошибок

Доля правильных ответов (Accuracy)	$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$
Точность (Precision)	$Точность = \frac{TP}{TP + FP}$
Полнота (Recall)	$Полнота = \frac{TP}{TP + FN}$
Пересечение над объединением (IoU)	Оценка перекрытия предсказанной ограничивающей рамки с истинной ограничивающей рамкой
Средняя точность (AP)	Площадь под кривой Precision-Recall
Средняя средняя точность (mAP)	Среднее значение AP
mAP50	Средняя точность, рассчитанная при пороге IoU, равном 0,50
mAP50-95	Средняя точность, рассчитанная при пороге IoU, от 0,50 до 0,95

Постановка эксперимента

Модель YOLOv8 размером nano, предобученная на наборе данных COCO, была дообучена и протестирована на описанном наборе изображений. Обучение выполнено в среде Google Colab с использованием GPU Tesla T4. Некоторые параметры обучения приведены в таблице 2.

Графики обучения представлены на рисунке 4. Кривая Точность-Полнота, полученная в процессе обучения, представлена на рисунке 5.

Таблица 2. Некоторые параметры обучения YOLOv8n [14]

Параметр	Значение
Epochs	50
Batch size	16
Image size	640×640
Optimizer	AdamW
Box	7.5

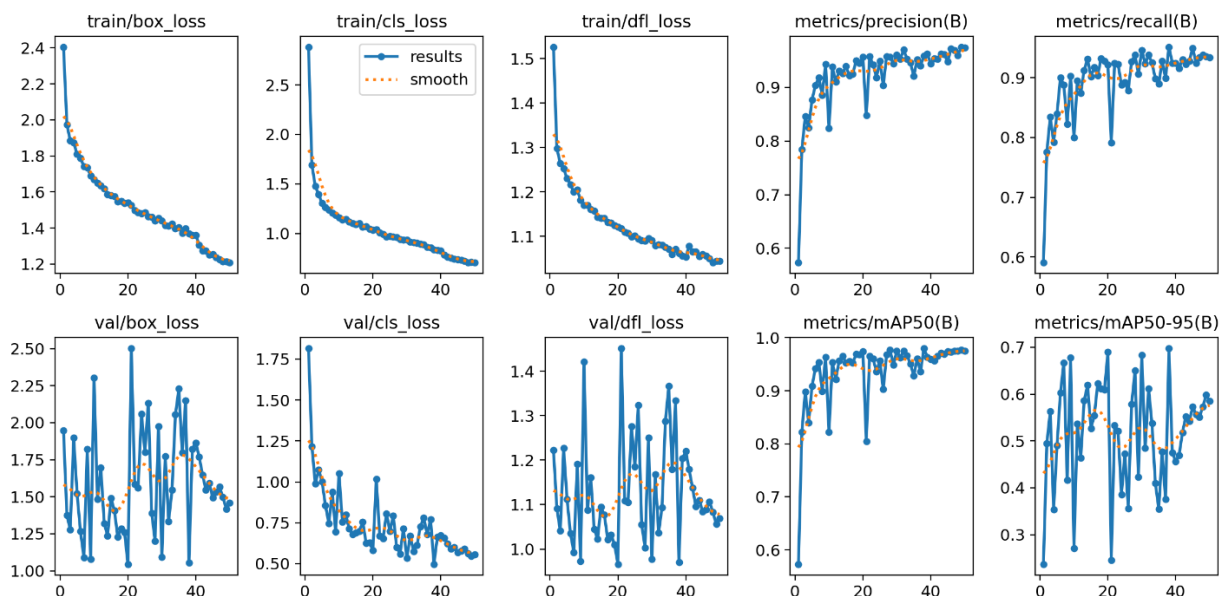


Рисунок 4. Графики обучения нейронной сети YOLOv8n

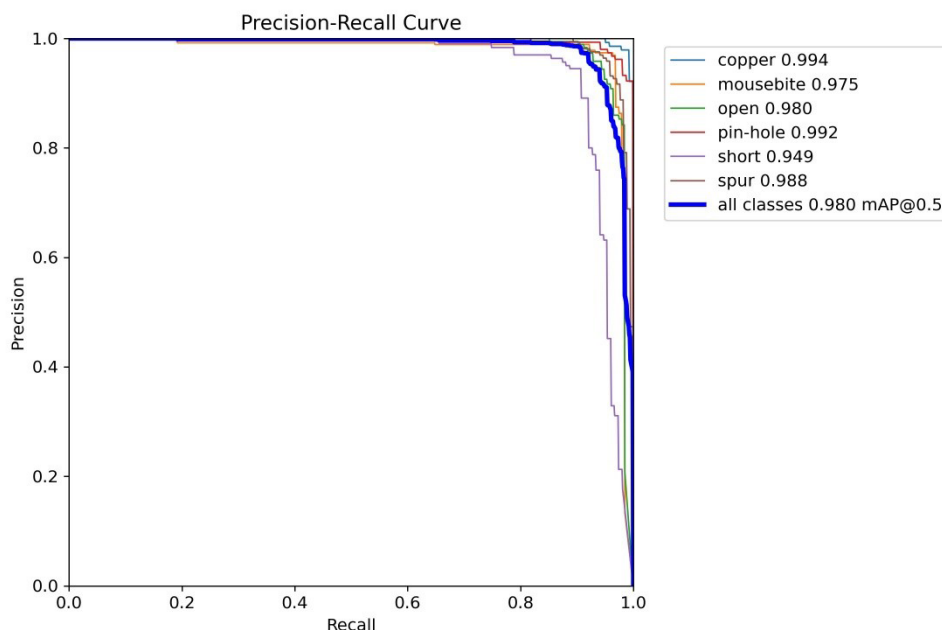


Рисунок 5. Кривая Точность-Полнота на этапе обучения

Результаты тестирования обученной модели на тестовом наборе данных представлены в таблице 3. Матрица ошибок для тестового набора представлена на рисунке 8. Результаты экспериментов показывают высокую точность детекции дефектов печатных плат (метрика mAP50 равна 0,98 на тестовом наборе данных).

Доля ложно-положительных ошибок выше, чем доля ложно-отрицательных ошибок. Это является более предпочтительной ситуацией, т. к. критичнее, когда дефекты будут пропущены, нежели, когда плата будет подвергнута повторному контролю.

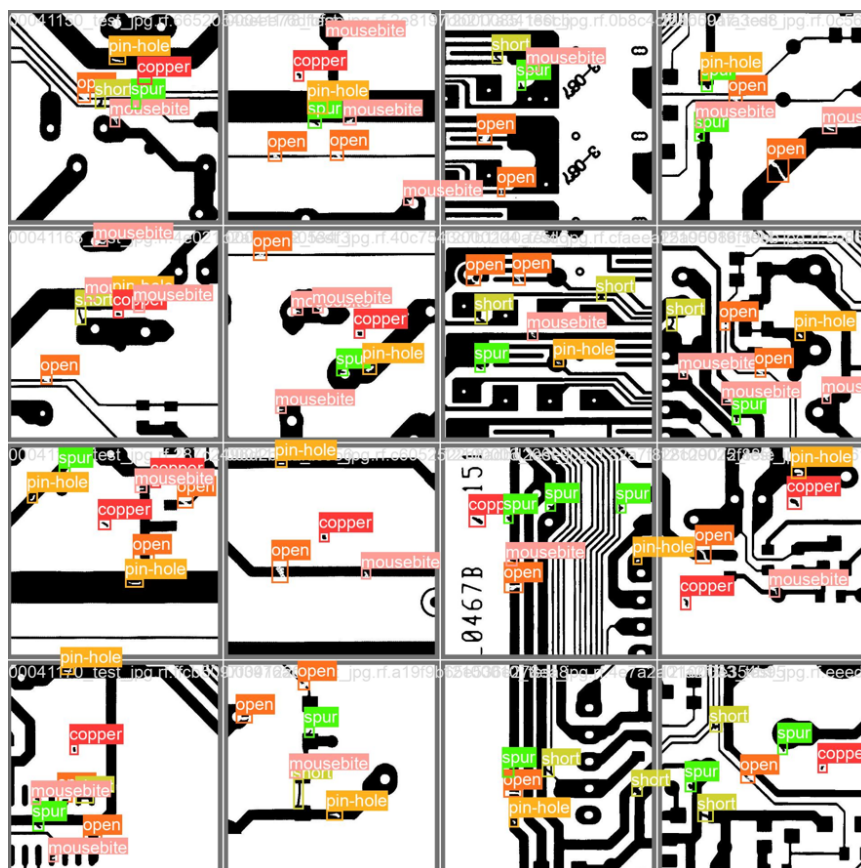


Рисунок 6. Разметка дефектов на изображениях из валидационного набора

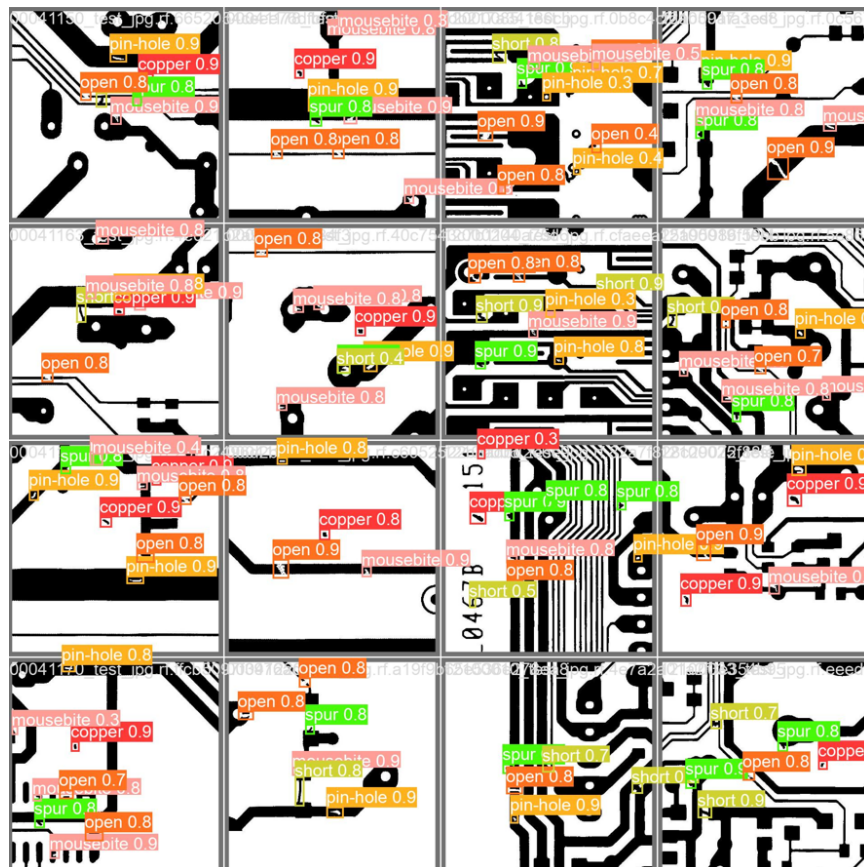


Рисунок 7. Найденные дефекты (класс и степень уверенности) на изображениях, представленных на рисунке 6

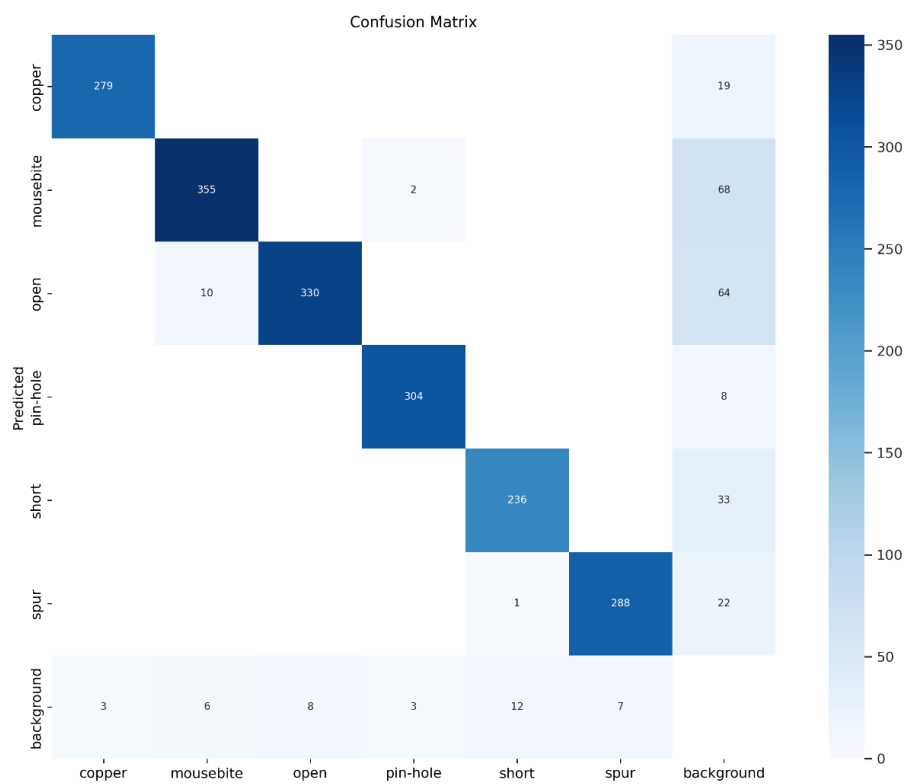


Рисунок 8. Матрица ошибок для тестового набора данных

Класс	Число изображений	Число дефектов	Метрики ограничивающего прямоугольника			
			Precision	Recall	mAP50	mAP50-95
Все дефекты	300	1844	0.958	0.957	0.98	0.729
Copper	300	282	0.983	0.986	0.992	0.858
Mousebite	300	371	0.933	0.945	0.977	0.698
Open	300	338	0.906	0.956	0.972	0.654
Pin-hole	300	309	1	0.964	0.995	0.831
Short	300	249	0.953	0.928	0.957	0.628
Spur	300	295	0.975	0.963	0.989	0.705

Заключение

Авторами рассмотрены ключевые факторы и тенденции в проектировании и производстве печатных плат, условия возникновения и некоторые дефекты печатных плат. В работе рассмотрена задача детекции дефектов на изображениях печатных плат

и решена прикладная задача. Выбран публичный набор изображений, содержащих дефекты 6 классов. На основе архитектуры YOLOv8 проведено обучение модели на указанных изображениях, выполнена оценка точности на тестовом наборе. Метрика для оценки точности детекции mAP50 равна 0,98 на тестовом наборе данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. **What is the PCB Market Situation Now? (Update 2023).** – [Электронный документ]. – Режим доступа: <https://www.raypcb.com/pcb-market/> (дата обращения 07.05.2024).
2. **The Global Printed Circuit Board Market: Key Insights, Forecasts, & Growth Outlook.** – [Электронный документ]. – Режим доступа: <https://www.mktpcb.com/pcb-industry-statistics-trends-infographic/> (дата обращения 07.05.2024).
3. **Карпов, С.** Прецизионный контроль печатных плат. Что это? / Сергей Карпов // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – № 7. – С.37–40.
4. **Lehmann, David K.** X-ray systems for optimizing PCB inspection: x-ray systems are not all equal, and their differences affect the type of defects that can be detected / David K. Lehmann // Circuits Assembly. – 2002. – Т. 13, № 2. – С. 35–40.
5. **Girshnick R.** et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation [Электронный документ]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1311.2524> (дата обращения 07.05.2024).
6. **Girshnick R.** Fast R-CNN [Электронный документ]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1504.08083> (дата обращения 07.05.2024).
7. **Ren S.** et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks [Электронный документ]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1506.01497> (дата обращения 07.05.2024).
8. **Redmon J.** et al. You Only Look Once: Unified, real-time object detection [Электронный документ]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1506.02640> (дата обращения 07.05.2024).
9. **Redmon J.** et al. YOLO9000: Better, faster, stronger [Электронный документ]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1612.08242> (дата обращения 07.05.2024).
10. **Redmon J.** YOLOv3: An incremental improvement [Электронный документ]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1804.02767> (дата обращения 07.05.2024).
11. **YOLOv8: A New State-of-the-Art Computer Vision Model.** – [Электронный документ]. – Режим доступа: <https://yolov8.com/> (дата обращения 07.05.2024).
12. **A PCB defect dataset.** – [Электронный документ]. – Режим доступа: <https://github.com/tangsanli5201/DeepPCB> (дата обращения 07.05.2024).
13. **DeepPCB Image Dataset.** – [Электронный документ]. – Режим доступа: <https://universe.roboflow.com/tack-hwa-wong-zak5u/deeppcb-4dhir/dataset/5> (дата обращения 07.05.2024).
14. **Configuration - Ultralytics YOLOv8 Docs.** – [Электронный документ]. – Режим доступа: <https://docs.ultralytics.com/usage/cfg/#modes> (дата обращения 07.05.2024).

REFERENCES

1. **What is the PCB Market Situation Now?** (Update 2023). – [Online]. – Available: <https://www.raypcb.com/pcb-market/> (Date of access 07.05.2024).
2. **The Global Printed Circuit Board Market: Key Insights, Forecasts, & Growth Outlook.** – [Online]. – Available: <https://www.mktpcb.com/pcb-industry-statistics-trends-infographic/> (Date of access 07.05.2024).
3. **Karpov, S.** Precision Control of Printed Circuit Boards. What is this? / Sergey Karpov // *Tekhnologii v elektronnykh promyshlennosti.* – 2008. – № 7. – С.37–40.
4. **Lehmann, David K.** X-ray systems for optimizing PCB inspection: x-ray systems are not all equal, and their differences affect the type of defects that can be detected / David K. Lehmann // *Circuits Assembly.* – 2002. – Vol. 13, № 2. – P. 35–40.
5. **Girshnick R.** et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation [Online]. – Available: <https://arxiv.org/abs/1311.2524> (Date of access 07.05.2024).
6. **Girshnick R.** Fast R-CNN [Online]. – Available: <https://arxiv.org/abs/1504.08083> (Date of access 07.05.2024).
7. **Ren S.** et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks [Online]. – Available: <https://arxiv.org/abs/1506.01497> (Date of access 07.05.2024).
8. **Redmon J.** et al. You Only Look Once: Unified, real-time object detection [Online]. – Available: <https://arxiv.org/abs/1506.02640> (Date of access 07.05.2024).
9. **Redmon J.** et al. YOLO9000: Better, faster, stronger [Online]. – Available: <https://arxiv.org/abs/1612.08242> (Date of access 07.05.2024).
10. **Redmon J.** YOLOv3: An incremental improvement [Online]. – Available: <https://arxiv.org/abs/1804.02767> (Date of access 07.05.2024).
11. **YOLOv8: A New State-of-the-Art Computer Vision Model.** – [Online]. – Available: <https://yolov8.com/> (Date of access 07.05.2024).
12. **A PCB defect dataset.** – [Online]. – Available: <https://github.com/tangsanli5201/DeepPCB> (Date of access 07.05.2024).
13. **DeepPCB Image Dataset.** – [Online]. – Available: <https://universe.roboflow.com/tack-hwa-wong-zak5u/deeppcb-4dhir/dataset/5> (Date of access 07.05.2024).
14. **Configuration - Ultralytics YOLOv8 Docs.** – [Online]. – Available: <https://docs.ultralytics.com/usage/cfg/#modes> (Date of access 07.05.2024).

INYUTIN A.V.¹, LUKASHEVICH M.M.^{1,2}

PCB DEFECT DETECTION BASED ON YOLOv8 ARCHITECTURE

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

²*Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus*

The paper discusses the key factors and trends in the design and production of printed circuit boards (PCB), which determine the state of the art of the automatic PCB inspection. To search for and classify defects, it is proposed to use the method of detecting defects in images based on the YOLO family of object detection models. The model was trained on a public set of images of PCB with 6 classes of defects, and the accuracy was assessed using generally accepted metrics. On the test dataset, the average accuracy according to the mAP50 metric is 0.98.

Keywords: defect, printed circuit boards, detection, classification, neural networks



Инютин Александр Владимирович, заведующий лабораторией, Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси. Научные интересы – цифровая обработка изображений, распознавание образов в системах компьютерного зрения, обработка изображений дистанционного зондирования, обработка телеметрических данных в системах управления космическими аппаратами.

Alexander Inyutin, head of the laboratory, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus. His research interests focused on digital image processing and pattern recognition in computer vision systems, remote sensing image processing, telemetry processing in spacecraft control systems.



Лукашевич Марина Михайловна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем управления Белорусского государственного университета. Область научных интересов включает машинное обучение, глубокого обучение, компьютерное зрение, анализ данных.

Marina Lukashevich, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Management Systems at the Belarusian State University. Her research interests include machine learning, deep learning, computer vision, data analysis.

БУМАЙ А.Ю.

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ОБЛЕТЕ ЗАДАННЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРОСТРАНСТВА

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

В статье проводится анализ различных методов построения траекторий движения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) при облете заданных областей пространства. Приводятся аналитические результаты проведенных исследований в виде качественных иллюстраций рассматриваемых методов, а также предложенной методики формирования оптимальной траектории полета БЛА вдоль границ заданной области пространства, учитывающей соответствующие процессы изменения управляющего ускорения и скорости движения БЛА и позволяющей сформировать требования к системе управления БЛА на этапе предварительного проектирования. Проводится анализ методов формирования траекторий БЛА на основе которого сделан вывод о работоспособности предложенной методики для формирования оптимальной траектории БЛА при облете заданной области пространства и целесообразность ее дальнейшего использования в качестве основы для первоначального этапа синтеза системы управления БЛА.

Ключевые слова: построение траектории, заданная область, беспилотный летательный аппарат, оптимальная траектория, математическое моделирование

Введение

Одной из задач при разработке систем управления (СУ) беспилотных летательных аппаратов (БЛА) на первоначальном этапе является создание алгоритмов формирования траектории полета БЛА, которая должна проходить через заданные точки пространства. Ввиду того что БЛА имеет ограниченный радиус действия, время, затрачиваемое на выполнение поставленной задачи, должно быть сведено к минимуму [1]. Разнообразные задачи, решаемые современными БЛА, обеспечиваются выполнением полета по заданной траектории с соблюдением режима полета во времени и прохождением БЛА через заданные точки пространства, при этом БЛА должен иметь возможность приближаться к месту выполнения задачи с определенных направлений. Одной из вспомогательных задач при следовании по заданной траектории является недопустимость попадания БЛА в заданные области пространства, которые могут представлять собой зоны, запрещенные для полетов или препятствия. Следовательно, ограничения, наложенные на траекторию полета БЛА, всегда будут основными факторами в любом алгоритме формирования траектории БЛА. Алгоритмы и методики формирования траектории должны быть реализуемы на борту БЛА и работать в режиме реального времени, позволяя БЛА при необходимости перепланировать свою траекторию без существенной задержки по времени.

Существуют определенные государственные стандарты и рекомендуемая практика, в

отношении эксплуатационных маршрутов БЛА с соответствующими ограничениями, а также задачами, выполняемыми БЛА, разработанных с учетом действующих в государстве нормативно правовых документов [2]. Соответствующие требования подлежат выполнению разработчиком БЛА и должны учитывать тип летательного аппарата, сложность установленного на борту оборудования, характеристики средств обеспечения захода на посадку, оборудования взлетно-посадочной полосы, а также – квалификацию операторов БЛА [2].

Методы и подходы к формированию траектории различаются в зависимости от области применения БЛА. В настоящее время в исследовательской литературе доступно множество подходов к решению задач формирования траекторий БЛА при облете заданных областей пространства и каждый подход имеет свои достоинства и недостатки. Современные алгоритмы формирования оптимальной траектории полета БЛА при облете заданных областей пространства представляют интерес в качестве предмета исследования для специалистов, разрабатывающих СУ БЛА в связи с ростом сфер применения БЛА и количеством и сложностью задач, которые они способны решать.

Методы формирования траекторий БЛА при облете заданных областей пространства

Большинство современных методов и подходов к формированию траектории можно представить в виде упрощенной схемы, где входными данными для формирования траектории

являются путевые точки, а также положение и размер заданных областей пространства. При создании траектории оператором БЛА задаются путевые точки, которые затем соединяются линиями, которые, в свою очередь, соединяются с начальной и конечной точками и формируют одну или несколько траекторий для данной карты известных местоположений, учитывающих расположение обозначенных областей, которые могут быть местами для посещения или местами, которых следует избегать (препятствий, запретных зон и угроз). Однако это не единственный способ создания траектории [2, 3].

Среди различных методов формирования траектории, позволяющих облетать заданные области пространства следует выделить несколько наиболее известных и распространенных методов формирования траектории, основанных на различных критериях [3].

Метод диаграммы Вороного – это метод формирования траектории, представляющий собой формирование связанного графа, проходящего через вершины полигонов («заборов») вокруг заданных областей пространства. Каждое ребро полигонов определяется путем построения набора линий, соединяющих центры заданных областей пространства. Множество многоугольных полигонов («заборов») строится путем рисования набора линий, перпендикулярных линиям, соединяющим центры заданных областей пространства, а далее они корректируются так, чтобы количество вершин было минимальным. Пример диаграммы Вороного показан на рисунке 1 [3, с. 15].

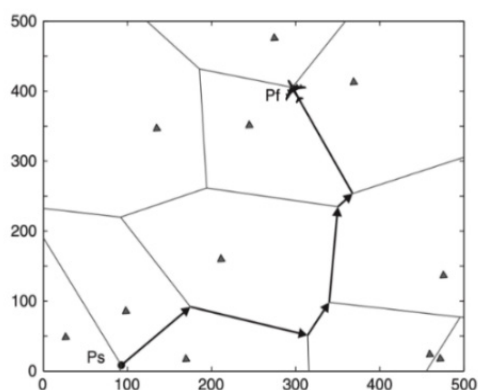


Рисунок 1. Метод диаграммы Вороного

Полученные полигональные «заборы» можно рассматривать как связный граф. Для поиска маршрута, соединяющего начальную и конечную вершины графа следует использовать известные алгоритмы поиска в графе. Диаграмма Вороного используется для создания траектории полета БЛА путем добавления скруглений в вершинах. Однако этот метод связан со сложностью решения обыкновенных дифференциальных уравнений и

с ограничениями кривизны. В некоторых случаях рассматривается способ, где траектория Вороного интерполируется серией кубических сплайнов, присваивая каждому местоположению препятствия стоимость [3, с. 15].

Метод клеточной декомпозиции – это метод формирования траектории, основанный на том, что заданная область делится на непересекающиеся ячейки. Затем генерируются возможные траектории, которые проходят через соседние свободные ячейки, не занятые препятствиями. Препятствия изолируются путем нахождения связи между свободными ячейками. Таким образом, создается дискретная версия заданной области с возможностью использовать известные алгоритмы поиска для соединения соседних свободных ячеек. Метод клеточной декомпозиции используется для создания траектории полета БЛА путем добавления скруглений в вершинах. В некоторых случаях рассматривается способ, где сформированная траектория интерполируется серией кубических сплайнов, присваивая каждому местоположению препятствия стоимость.

На рисунке 2 показана схема процесса формирования траектории методом клеточной декомпозиции. Заштрихованные ячейки исключаются, поскольку они заняты препятствиями (серые области) [3, с. 17].

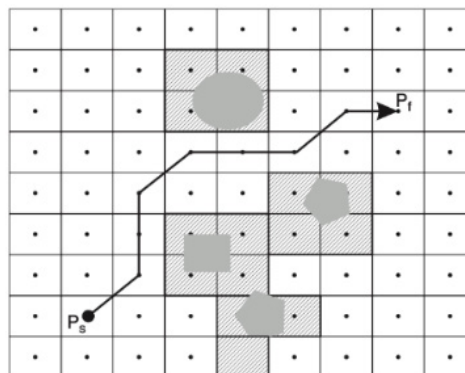


Рисунок 2. Метод клеточной декомпозиции

Метод Дабинса – это метод формирования траектории, при котором кратчайшая возможная траектория формируется путем замены частей отрезков, прилегающих к углу ломаной, дугой окружности, которая соответствует максимальной кривизне между двумя точками с определенной ориентацией на плоскости и является либо путем CLC (curve-line-curve), либо путем CCC (curve-curve-curve), либо их подмножеством, где С представляет собой округлую дугу, а L представляет прямую, касательную к С. Описанный метод формирования траекторий позволяет сформировать траекторию CLC, образованную путем соединения двух дуг окружности касательной к ним линией, и траекторию

ССС образованную тремя последовательными дугами окружности, касательными друг к другу. Подмножествами этих траекторий являются CL, LC и CC траектории. На рисунке 3 показаны траектории CLC и CCC [3, с. 31].

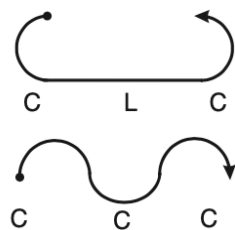


Рисунок 3. CLC и CCC вид траекторий Дабинса

Траектория Дабинса имеет простую геометрию и, следовательно, ее можно легко реализовать на борту БЛА. Однако изменения кривизны траектории носят прерывистый характер, когда траектория меняется с дуги на прямолинейный сегмент и наоборот. Этот разрыв может оказаться трудным для целей практической реализации, поскольку БЛА должен будет следовать по такой траектории и он не сможет мгновенно изменить свое поведение при пересечении границы сегмента [3, с. 31].

Метод *клотоидной траектории* – это метод формирования траектории, заключающийся в том, что при формировании траектории ее кривизна на заданных отрезках изменяется линейно по всей длине заданного отрезка (клотоиды) [3, с. 47]. Профиль кривизны такой траектории в сравнении с траекторией Дабинса показан на рисунке 4.

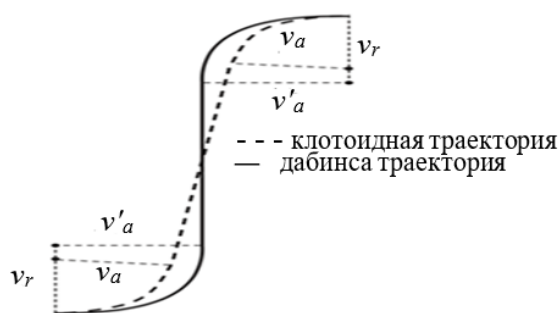


Рисунок 4. Профиль кривизны Дабинса и клотоидной траектории

В отличие от траектории Дабинса, где кривизна на отдельных участках траектории постоянна, в клотоидной траектории кривизна изменяется линейно по длине дуги от нуля на границах до максимума в середине дуги. Линейное изменение кривизны в зависимости от длины клотоиды обеспечивает плавный переход к отрезку с нулевой кривизной и обратно. Метод создания составной клотоидной траектории аналогичен траектории Дабинса [3, с. 31].

В работе [4] предложен метод формирования траектории беспилотного летательного аппарата при облете запретной зоны – как метод синтеза оптимального ускорения центра масс беспилотного летательного аппарата при облёте им запретных зон, учитывающий ограничения, наложенные на траекторию полета и динамические характеристики БЛА, позволяющий минимизацию затрат на управление БЛА [4, 5, 9]. В качестве запретной области в работе [4] рассматривается запретная зона № 181 Минского национального аэропорта «Минск 2» [10].

В работе [5] на основе известных результатов аналитического решения подобных задач [11] получено выражение для бокового ускорения в горизонтальной плоскости, обеспечивающего полет БЛА по оптимальной траектории. Предложенный в работе [5] метод основан на минимизации функционала качества (задача Больца), терминальные члены которого включают минимум промаха БЛА при пролете через заданную k -ю точку пространства и минимум отклонения вектора скорости БЛА от заданного значения в момент пролета через эту точку. Задание направления вектора скорости в момент прохождения БЛА через заданную k -ю точку задается как направление на следующую заданную $k+1$ точку пространства. Интегральное слагаемое минимизируемого функционала (квадратичный функционал Летова–Калмана) представляет собой минимизацию управляющего ускорения БЛА которое характеризует затраты на управление. Для всех слагаемых минимизирующего функционала назначаются нормировочные коэффициенты, значения которых определяются максимально допустимыми значениями переменных входящих в функционал качества.

В работе [4] путем математического моделирования проведено исследование формирования траектории полета беспилотного летательного аппарата при облете запретной зоны. На рисунке 5 представлена траектория полета БЛА с точками через которые должен пролететь БЛА.

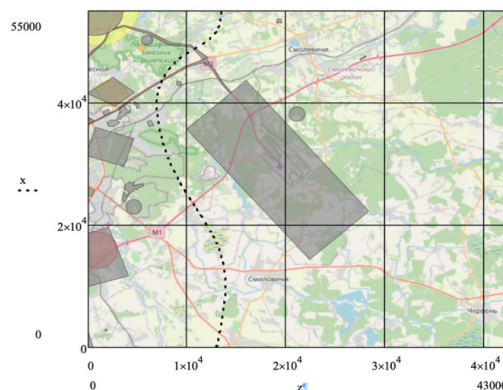


Рисунок 5. Траектория БЛА при облете запретной зоны

Координаты точек задаются с учетом безопасного расстояния до запретной зоны (Минского национального аэропорта «Минск 2»).

Заключение

Проведенный анализ методов формирования траектории при облете заданных областей пространства показал, что приведенные традиционные методы не учитывают динамику полета БЛА

по заданной траектории при облете заданных областей пространства и наложенные при этом ограничения. На основе приведенного исследования сделан вывод о необходимости учета динамические характеристики БЛА при формировании траектории облета заданной области пространства. Для решения поставленных задач целесообразно применять методы и алгоритмы формирования траектории беспилотных летательных аппаратов при облете запретных зон [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Моисеев, В.С.** Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами / В.С. Моисеев. – Казань: ГБУ РЦМКО, 2013. – 768 с.
2. **Об утверждении Авиационных правил полетов в воздушном пространстве Республики Беларусь** [Электронный ресурс]: постановление Гос. комитета по авиации Респ. Беларусь, М-ва обороны Республики Беларусь, 01 июня 2004 г., № 7/30 // Воен. информ. портал М-ва обороны Респ. Беларусь. – Режим доступа: <http://ais.mil.by/normativ/doc/7-30.pdf>. – Дата доступа: 15.05.2024.
3. **Tsourdos, A.** Cooperative path planning of unmanned aerial vehicles / A. Tsourdos, B.A. White, M. Shanmugavel. – Chichester: John Wiley & Sons, 2011. – 190 p.
4. **Бумай, А.Ю.** Формирование траектории беспилотного летательного аппарата при облете запретных зон / А.Ю. Бумай, А.А. Лобатый, А.М. Авсиевич // Систем. анализ и приклад. информатика. – 2021. – № 4. – С. 47–53.
5. **Лобатый А.А.** Формирование оптимальных параметров траектории пролета беспилотного летательного аппарата через заданные точки пространства / А.А. Лобатый, А.Ю. Бумай, Ду Цзюнь // Доклады БГУИР. – 2019. – № 7-8. – С. 50–57.
6. **Методы классической и современной теории автоматического управления:** в 5 т. / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 5 Т. Методы современной теории автоматического управления. – 784 с.
7. **Лобатый, А.А., Икуас Ю.Ф.** Оптимальное программное управление беспилотным летательным аппаратом / А.А. Лобатый, Ю.Ф. Икуас // Наука и Техника, – 2012. – № 73. – С. 17–20.
8. **Красовский, А.А.** Системы автоматического управления летательных аппаратов / А.А. Красовский, Ю.А. Вавилов, А.И. Сучков. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1986. – 477 с.
9. **Лобатый А.А.** Аналитический синтез управляющего ускорения беспилотного летательного аппарата / А.А. Лобатый, А.Ю. Бумай, С.С. Прохорович // Наука и Техника, – 2021. – Т. 20. – № 4. – С. 338–344.
10. **Национальное кадастровое агентство** [Электронный ресурс]: Публичная кадастровая карта / Дополнительные слои: Зоны ограничений/запретные/опасные/запрещенные для использования авиамodelей. – Режим доступа: <https://map.nca.by/layers>. – Дата доступа: 15.05.2024..
11. **Брайсон А.** Прикладная теория оптимального управления / А. Брайсон, Хо Ю-ши. – М.: Мир, 1972. – 544 с.

REFERENCES

1. **Moiseev V.S.** Applied theory of control of unmanned aerial vehicles / V.S. Moiseev. – Kazan: GBU RCMKO, 2013. – 768 p.
2. **On approval of Aviation Rules for flights in the airspace of the Republic of Belarus** [Electronic resource]: State resolution Aviation Committee of the Republic Belarus, Ministry of Defense of the Republic of Belarus, 01 June 2004 г., № 7/30 // Military information portal of the Ministry of Defense of the Republic of Belarus. – Mode of access: <http://ais.mil.by/normativ/doc/7-30.pdf>. – Дата доступа: 15.05.2024.
3. **Tsourdos A.** Cooperative path planning of unmanned aerial vehicles / A. Tsourdos, B.A. White, M. Shanmugavel. – Chichester: John Wiley & Sons, 2011. – 190 p.
4. **Lobaty A.A., Avsieich A.M., Bumai A.Y.** Formation of the trajectory of an unmanned aerial vehicle when flying around prohibited areas. Sistemnyj i prikladnaya informatika. – 2021. – № 4. – Pp. 47–53.
5. **Lobaty A.A., Bumai A.Y., Du J.** Formation of optimal parameters of the flight path of an unmanned aerial vehicle through specified points in space. Doklady BGUIR. – 2019. – № 7-83. – Pp. 50–57.
6. **Methods of classical and modern theory of automatic control:** in 5 v. / ed. K.A. Pupkova and N.D. Egupova. – М.: Izdatelstvo MGTU im. N. E. Baumana, 2004. – 5 V. Methods of classical and modern theory of automatic control. – 784 p.

7. Lobaty A.A., Ikuas Y.F. Optimal software control of the unmanned aerial vehicle. Nauka i Tehnika. – 2012. – № 73. – Pp. 17–20.
8. Krasovskiy A.A. Automatic aircraft control systems / A. A. Krasovskij, Y. A. Vavilov, A. I. Suchkov. – M.: VVIA im. N.E. Zhukovskogo, 1986. – 477 p.
9. Lobaty A.A. Analytical synthesis of the control acceleration of an unmanned aerial vehicle / A. A. Lobaty, A. Y. Bumai, S. S. Prohorovich // Nauka i Tehnika. – 2021. – V. 20. – № 4. – PP. 338–344.
10. National Cadastral Agency [Electronic resource] : Public cadastral map / Addition layers : Zones restricted/forbidden/dangerous/prohibited for using UAV. – Mode of access: <https://map.nca.by/layers>. – Date of access: 15.05.2024.
11. Bryson A., Ho Yushi. Applied optimal control theory. – M. : Mir, 1972. – 544 p.

BUMAI A. Y.

METHODS FOR FORMATION TRAJECTORIES OF MOTION OF UNMANNED AIRCRAFT VEHICLES WHEN FLYING AROUND SPECIFIED AREAS OF SPACE

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

The article analyzes various methods for constructing motion trajectories of unmanned aerial vehicles (UAVs) when flying over specified areas of space. The analytical results of the studies are presented in the form of qualitative illustrations of the methods under consideration, as well as the proposed methodology for forming an optimal UAV flight trajectory along the boundaries of a given area of space, taking into account the corresponding processes of changing the control acceleration and speed of the UAV and allowing the formation of requirements for the UAV control system at the preliminary development stage. An analysis of methods for forming UAV trajectories is carried out, on the basis of which a conclusion is made about the operability of the proposed methodology for forming the optimal UAV trajectory when flying over a given area of space and the feasibility of its further use as the basis for the initial stage of synthesis of the UAV control system.

Keywords: trajectory formation, specified area, unmanned aerial vehicle, optimal trajectory, mathematical modeling



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

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

E-mail: andrei.bumai@bntu.by

ШЕЙНИКОВ А.А., МАЛКИН В.А., СМОЛЕНСКИЙ Э.А., ИВАНИЦКИЙ Л.А.

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА МАЛОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»,
г. Минск, Республика Беларусь

Разработана оптико-электронная корреляционно-экстремальная навигационная система беспилотного летательного аппарата. Предлагаемая навигационная система отличается применением малогабаритных и доступных по цене цифровой камеры и вычислителя, что критично для массово применяемых малых беспилотных летательных аппаратов военного назначения. Разработанное алгоритмическое обеспечение системы отличается применением алгоритмов реконструкции трехмерной цифровой модели местности по оптическим цифровым изображениям от бортовой цифровой камеры беспилотного летательного аппарата, а также применением алгоритмов корреляционной обработки текущих и эталонных цифровых моделей местности, что обеспечивает возможность точной автономной воздушной навигации по видовой информации. Обоснованы требования к параметрам полета малого беспилотного летательного аппарата с оптико-электронной корреляционно-экстремальной навигационной системой. Обосновано значение периода коррекции бортовой бесплатформенной инерциальной навигационной системы по данным предлагаемой оптико-электронной корреляционно-экстремальной навигационной системы. Представлены результаты исследований точности разработанной оптико-электронной корреляционно-экстремальной навигационной системы в зависимости от параметров съемки и качества эталонных моделей.

Ключевые слова: система технического зрения, оптико-электронная корреляционно-экстремальная навигационная система, трехмерная модель местности, фотограмметрия

Введение

Длительное и точное определение навигационных параметров воздушных боевых роботов (ВБР), к которым можно отнести беспилотные летательные аппараты (БЛА) и крылатые ракеты (КР), до недавнего времени было невозможным без использования сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС). Однако в настоящее время, как показывает анализ современных военных конфликтов, средства радиоэлектронной борьбы позволяют подавлять и подменять такие сигналы [1]. Поэтому актуальной становится задача разработки систем автономной воздушной навигации (АВН), не требующих для обеспечения движения по заданному маршруту сигналов СРНС. Что касается штатных автономных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) на микроэлектромеханических модулях (МЭМС) [2] (базовых элементов навигационных комплексов (НК) малых БЛА), то они без периодической коррекции [3] с течением времени достаточно быстро накапливают ошибку счисления координат [4]. В таких условиях альтернативой СРНС могут стать автономные корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС) [5]. Однако, известные образцы КЭНС (TERCOM (Terrain Contour Matching) КР

«Tomahawk», TERPROM (Terrain Profile Matching) КР «Storm Shadow») предполагают наличие на борту носителя дорогих и габаритных систем активной оптической локации (лидар) или радиолокации (бортовая радиолокационная станция) для получения изображений подстилающей местности. Кроме того, бортовые системы активной локации снижают скрытность КР, что увеличивает возможности противника по противодействию. Существуют также КЭНС на основе систем пассивной оптической локации (DSMAC (Digital Scene Matching Area Correlator) КР «Tomahawk»), IBN (Image Based Navigation) КР «Taurus», КЭНС БЛА ZALA 421-16E5G). Однако здесь следует отметить, что обработка цветных плоских цифровых изображений (ЦИ) с использованием технологий машинного зрения и распознавание наземных объектов с использованием технологий искусственного интеллекта требует наличия на борту ВБР достаточно дорогого высокопроизводительного процессора, что не всегда является целесообразным. Так, малые БЛА-камикадзе не могут нести тяжелую боевую часть и не в состоянии уничтожить стратегически важные, дорогие объекты противника, даже действуя в составе группы. Следовательно, встает вопрос о соответствии цены массово применяемых и безвозвратно расходуемых БЛА, стоимости, поражаемой ими, относительно недорогой

тактической цели. Экономическая целесообразность возникает при кратном соотношении значений этих параметров в пользу объекта атаки. Известно, что новые модификации систем DSMAC используют в качестве эталонных не изображения местности, а цифровые модели местности (ЦММ). Дело в том, что в настоящее время идет масштабная оцифровка территорий для целей создания геоинформационных систем (ГИС). Эта детальная информация может быть использована в качестве существенного информационного ресурса для обеспечения АВН. Появляется возможность значительного упрощения НК малых БЛА в связи с тем, что они будут являться всего лишь потребителями заранее подготовленной детальной информации, выработанной гораздо более сложными обеспечивающими техническими системами. В контексте решаемой задачи разработки КЭНС для малых БЛА, предлагается обратить внимание на трехмерные ЦММ. Использование третьего измерения позволит увеличить точность позиционирования за счет увеличения объема обрабатываемых данных, частичного решения проблем теней и случайной динамики диапазона яркостей ЦИ в видеопотоке [6]. Современные технологии позволяют производить трехмерную реконструкцию участков местности по последовательности ее плоских ЦИ фотограмметрическим методом [7]. Причем не обязательно обеспечивать сверхвысокую точность составления трехмерной ЦММ и результатов ее реконструкции. Так, в современных научных публикациях показано, что для этих целей

достаточен второй уровень детализации LoD2 (Level of Detail) [8].

Постановка задачи

Требуется разработать оптико-электронную (ОЭ) КЭНС малого БЛА военного назначения на основе системы технического зрения (СТЗ), использующую в качестве эталонов трехмерные ЦММ. Для достижения поставленной цели необходимо последовательно решить следующие задачи: определить состав и характеристики элементов НК малого БЛА; разработать математический аппарат и программно-алгоритмическое обеспечение трехмерной реконструкции ЦММ из ЦИ; обосновать требования к параметрам полета малого БЛА с ОЭ КЭНС; обосновать значение периода коррекции бортовой БИНС по данным ОЭ КЭНС БЛА; разработать программно-алгоритмическое обеспечение подготовки и корреляционной обработки эталонных и текущих ЦММ; провести анализ результатов исследования точности разработанной ОЭ КЭНС в зависимости от параметров съемки и качества эталонных моделей.

Начальные условия

В качестве малого БЛА рассматривается квадрокоптер типа DJI Mavic 3 с гиростабилизированной бортовой цифровой камерой (БЦК) Hasselblad 20 Мп. Характеристики БЦК приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики БЦК

Наименование параметра/характеристики	Обозначение	Значение параметра	Единицы измерения
Сторона матрицы БЦК (параллельная полету)	x_M	18	мм
Сторона матрицы БЦК (перпендикулярная полету)	y_M	13,5	мм
Площадь матрицы БЦК (стороны 18 мм и 13,5 мм)	S_M	243	мм ²
Размер пикселя матрицы БЦК	p	1,5	мкм
Фокусное расстояние БЦК	f	14	мм
Период следования кадров	τ	35	мкс

В таблице 2, для сравнения, приведены характеристики известных БИНС, работающих на различных физических принципах.

Анализ таблицы 2 показывает, что для малого БЛА, с учетом цены и массы оборудования,

подходит только БИНС на МЭМС, обладающая низкой точностью.

В таблице 3 для сравнения приведены характеристики известных измерителей высоты полета, работающих на различных физических принципах.

Таблица 2

Характеристики известных разнородных БИНС

БИНС	Принцип работы	Цена, долларов	Масса, кг	Погрешность
ADIS16488	БИНС на МЭМС	Около 1500	0,05	3 % от пройденного пути за 5 мин
БИНС 500НС	БИНС на волоконно-оптических гироскопах	Около 15000	4	1,4 км за час полета
БИНС-21	БИНС на лазерных гироскопах	Около 100000	15	0,9 км за час полета

Таблица 3

Характеристики известных разнородных измерителей высоты полета

Высотомер	Принцип работы	Цена, долларов	Масса, кг	Диапазон измерений, м	Погрешность, м
GY-BMP280	Барометрический МЭМС датчик	4	0,002	0 9000	± 1
RGK D600	Оптический дальномер	180	0,2	3 600	± 1
A-065A	Малогабаритный радиовысотомер	Около 2000	0,9	0,5 2000	$\pm 1,5$

Анализ таблицы 3 показывает, что для малого БЛА, с учетом цены, массы и обеспечиваемой точности, предпочтительным является барометрический МЭМС-датчик.

Решение задачи

Для осуществления автоматической привязки БЛА к участку местности с известными координатами по видовой информации производится сопоставление обработанных результатов текущей съемки подстилающей земной поверхности с эталонной ЦММ [9]. Трехмерная реконструкция текущей ЦММ выполняется с использованием алгоритмов машинного зрения [10] путем сравнения координат подобных точек на двух смещенных ЦИ (стереопаре), сделанных во время полета с определенной задержкой. Съемка осуществляется гиросtabilизированной бортовой цифровой камерой (БЦК), направленной в надир [11]. В процессе реконструкции трехмерной геометрии сцены по стереопаре, с использованием алгоритмов машинного зрения производится вычисление карты глубины сцены (КГС) – ЦИ, яркость пикселей которого, соответствует расстоянию от поверхностей объектов сцены до точки обзора [10]. Другими словами, на КГС проекции более высоких объектов сцены имеют более низкую яркость. Далее осуществляется преобразование результатов расчета в восстановленную (текущую) ЦММ

с использованием фотограмметрических методов [12]. Так, на рисунке 1 приведена схема измерений высот объектов сцены (ВОС) с помощью БЦК.

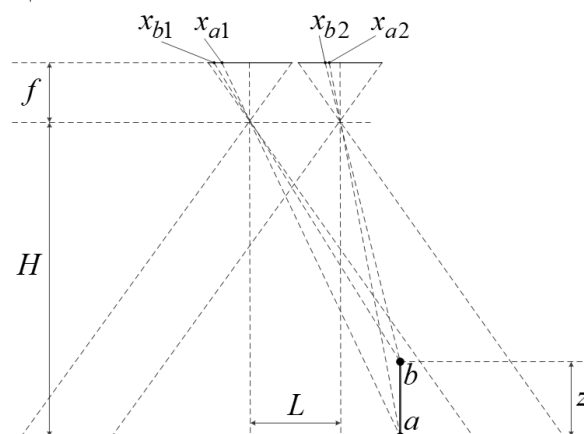


Рисунок 1. Схема измерения ВОС по стереопаре

На рисунке 1: a, b – нижняя и верхняя точка объекта сцены соответственно; $x_{a1}, x_{b1}, x_{a2}, x_{b2}$ – координаты проекций точек a, b (отсчитываемые от левого края ЦИ) на первом и втором кадре соответственно; $L = V\tau$ – путь, пройденный БЛА за время τ между моментами съемки двух ЦИ, составляющих стереопару; V – истинная скорость БЛА; z – ВОС. В соответствии со схемой измерений, для расчета ЦММ по стереопаре (преобразования

КГС в ЦММ) получены выражения для прямого и обратного расчета:

$$z = \frac{\xi H^2}{\xi H + V\tau f}; \quad \xi = \frac{zLf}{H(H-z)}, \quad (1)$$

где $\xi = (x_{a1} - x_{b1}) - (x_{a2} - x_{b2})$ – относительное смещение точек a и b в стереопаре.

С учетом того, что измерения проводятся с использованием цифровой матрицы БЦК, следует учитывать дискретность результатов измерений:

$$\Delta\xi = \xi - \text{div}(\xi/p). \quad (2)$$

Тогда погрешность измерения ВОС Δz , обусловленную дискретностью измерителя, можно рассчитать так:

$$\Delta z = \frac{\Delta\xi H^2}{\Delta\xi H + V\tau f}; \quad \Delta z_{\max} = \frac{pH^2}{pH + V\tau f}. \quad (3)$$

На рисунке 2 представлена зависимость погрешности измерения ВОС от H и f .

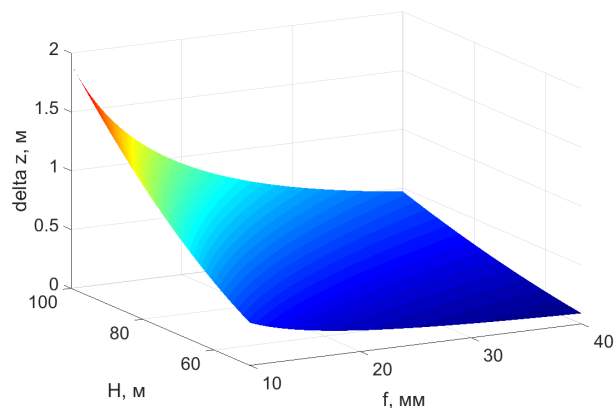


Рисунок 2. Зависимость погрешности измерения ВОС от H и f

Из рисунка 2 видно, что главным фактором, влияющим на точность фотограмметрических

измерений, является H . Быстрый рост погрешности при увеличении H выше 100 м еще раз подтверждает выводы, сделанные авторами ранее в [13]. Таким образом, можно с уверенностью констатировать, что в качестве рабочей высоты полета БЛА следует выбирать $H = 100$ м. При большей H необходимо увеличение f , что потребует обеспечения более жестких требований к стабилизации БЦК.

Из таблицы 3 видно, что современный технологический уровень обеспечивает измерение H в рассматриваемом диапазоне (0–100 м) с погрешностью не более ± 1 м. Соответственно, в качестве критерия по точности измерения ВОС с использованием предлагаемой системы целесообразно выбрать: $\Delta z_{\max} = 1$ м. Для обеспечения такой точности, с учетом (3), а также с учетом известных характеристик БЦК (таблица 1) и установленного значения H (100 м), целесообразно выбрать $V = 109$ км/ч.

Для обеспечения точности совмещения текущей ЦММ (ТМ) и эталонной ЦММ (ЭМ) с одной стороны желательно увеличивать площадь ЭМ для обеспечения попадания в кадр максимального числа контрастных уникальных участков сцены. С другой стороны, известно [14], что для минимизации вычислительных ресурсов при поиске глобального экстремума (ГЭ) корреляционной функции (КФ), желательно обеспечить $S_{\text{ЭМ}}/S_M = 1/10$, где $S_{\text{ЭМ}} = x_{\text{ЭМ}} \times y_{\text{ЭМ}}$ – площадь квадратного участка цифровой матрицы камеры (ЦМ), в который полностью укладывается проекция круглого наземного навигационного ориентира (ННО) радиусом R [15], $x_{\text{ЭМ}}, y_{\text{ЭМ}}$ – геометрические размеры этого участка, $S_M = x_M \times y_M$ – площадь ЦМ. Таким образом, зная x_M, y_M легко определить $x_{\text{ЭМ}}, y_{\text{ЭМ}}$. Зная H и f можно вычислить размеры участка земли с ННО $x_{\text{ЭЗ}}, y_{\text{ЭЗ}}$, а также размеры прямоугольного участка земли, захватываемого камерой x_3, y_3 (рисунок 3).

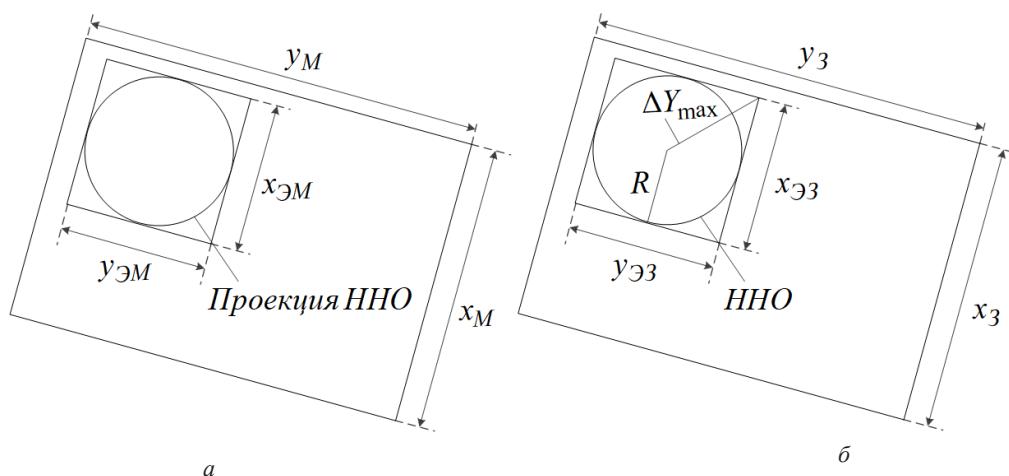


Рисунок 3. Участок земли, захватываемый бортовой камерой БЛА: а – цифровая матрица бортовой камеры; б – участок земли, захваченный камерой

Одной из задач при реализации КЭНС, является оценка бокового отклонения [16] БЛА (ΔY) от линии заданного пути (ЛЗП) за время t для прогнозирования координат проекции очередного ННО на очередном снимке. Такая оценка позволяет снизить вычислительные ресурсы, требуемые для

поиска ГЭ КФ, а также определить максимальное значение периода съемки местности ($T_{\max}$). Для определения характера зависимости $\Delta Y(t)$, обусловленной погрешностями БИНС, была использована методика, предложенная в [17]. В таблице 4 представлены начальные условия для расчетов.

Таблица 4. Начальные условия для расчета зависимости

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Общие параметры			
Ускорение свободного падения	g	9,8	м/с ²
Параметры полета БЛА			
Высота	H	100	м
Истинная скорость	V	109	км/ч
Параметры бортовой цифровой камеры БЛА			
Геометрические размеры ЦМ	x_M	18	мм
	y_M	13,5	мм
Вклад погрешностей гироскопов в ошибку БИНС			
Систематическая составляющая	σ_{syst}^{gyro}	4	град/ч
Шум (случайное блуждание угла)	ARW	0,2	град/ $\sqrt{ч}$
Нестабильность нуля (фликер-шум)	$\sigma_{BI}^{\Delta\omega}$	10	град/ч
Время корреляции	$T_c^{\Delta\omega}$	1000	с
Вклад погрешностей акселерометров в ошибку БИНС			
Шум (случайное блуждание угла)	VRW	0,0011	м/(с ² $\sqrt{Гц}$)
Нестабильность нуля (фликер-шум)	$\sigma_{BI}^{\Delta a}$	0,0001	м/с ²
Время корреляции	$T_c^{\Delta a}$	1000	с

Расчет $\Delta Y(t)$ производился согласно выражения [17] (рисунок 4):

$$\Delta Y(t) = \frac{g\sigma_{syst}^{gyro}}{6}t^3 + \left(\frac{ARW}{2\sqrt{5}} + \frac{3g\sigma_{BI}^{\Delta\omega}}{\sqrt{126T_c^{\Delta\omega}}} + \frac{\sigma_{BI}^{\Delta a}}{\sqrt{10T_c^{\Delta a}}} \right) t^{5/2} + \frac{\sigma_{syst}^{acc}}{2}t^2 + \frac{VRW}{\sqrt{3}}t^{3/2}. \quad (4)$$

С учетом [15], в качестве условия для коррекции БИНС по данным КЭНС было выбрано:

$$\Delta Y(T_{\max}) \geq \frac{H}{10f} \sqrt{x_m^2 + y_m^2}. \quad (5)$$

Для принятых значений параметров получены следующие результаты расчетов: $T_{\max} = 22$ с; $\Delta Y(T_{\max}) = 20,45$ м (рисунок 4). Полученные результаты расчетов согласуются с выводами, сделанными в [18].

Для нахождения максимума КФ $R_{\max}$ использовался классический алгоритм [18]:

$$R(x, y) = \frac{1}{x_{\text{ЭМ}} y_{\text{ЭМ}}} \sum_{i=0}^{x_{\text{ЭМ}}-1} \sum_{j=0}^{y_{\text{ЭМ}}-1} f_{\text{ЭМ}}(i, j) f_{\text{ТИ}}(i+x, j+y), \quad (6)$$

где x, y – смещение фрагмента $f_{\text{ЭМ}}$ относительно $f_{\text{ТИ}}$, $0 \leq x \leq (x_M - x_{\text{ЭМ}})$, $0 \leq y \leq (y_M - y_{\text{ЭМ}})$.

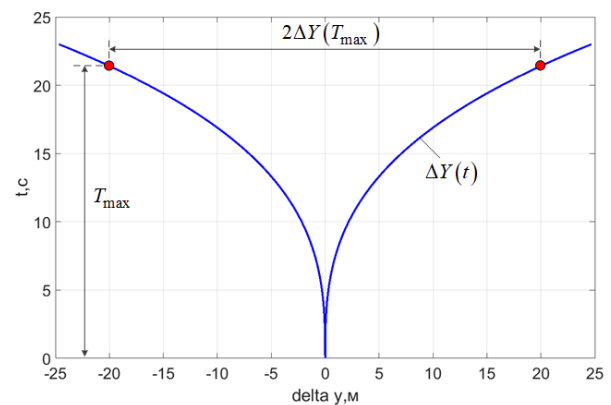


Рисунок 4. Оценка значения $T_{\max}$ по известному значению $\Delta Y_{\max}$

В [14] показано, что устойчивость алгоритмов поиска ГЭ КФ во многом зависит от степени геометрических искажений текущего изображения (ТМ). Для снижения этих искажений, перед сопоставлением с ЭМ, целесообразно осуществлять ее дополнительную обработку, включающую аффинные (сдвиг, поворот, изменение масштаба) преобразования с учетом результатов оценки пилотажно-навигационных параметров полета в НК БЛА [19]. Так, например, поворот ЭМ вокруг центра с координатами (x_r, y_r) на угол θ можно осуществить с использованием выражений [14]:

$$\begin{aligned} m' &= x_r + (m - x_r) \cos \theta - (n - y_r) \sin \theta; \\ n' &= y_r + (m - x_r) \sin \theta - (n - y_r) \cos \theta. \end{aligned} \quad (7)$$

где m, n – координаты отдельной точки исходной ЭМ в системе координат, связанной с ТМ; m', n' – координаты отдельной точки повернутой ЭМ в системе координат, связанной с ТМ.

На рисунке 5 приведен график зависимости значения максимума КФ $R_{\max}$ от угла поворота ЭМ θ , полученный в результате исследований с использованием видеозаписей реальных полетов БЛА. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с данными, приведенными в [14].

На рисунке 6 приведена исправленная ЭМ (повернутая на угол θ), и ТМ (с выделением совпадающего участка и оценкой значения $R_{\max}$).

В процессе исследований для построения ЭМ использовались стереопары, снятые ранее с этого же БЛА. Причем рассматривались следующие случаи: та же траектория полета БЛА (те же направление и высота полета) (рисунок 7, а) и измененная траектория полета (измененные направление и высота полета) (рисунок 7, б). Кроме этого для построения ЭМ использовались стереопары, снятые ранее со спутника (рисунок 7, в).

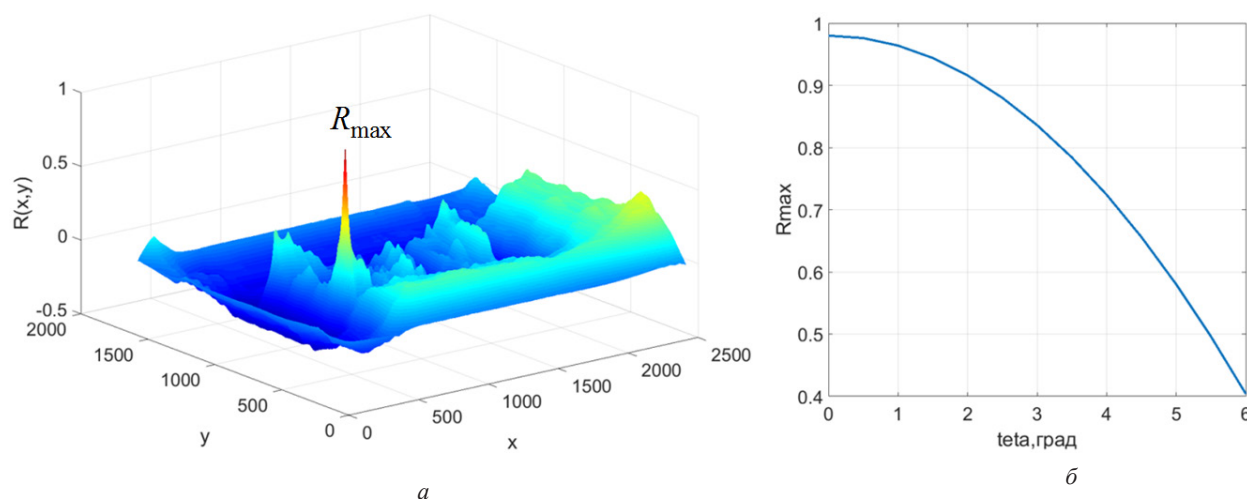


Рисунок 5. Зависимость значения максимума КФ от угла поворота ЭМ: а – вид КФ; б – зависимость $R_{\max}$ от θ

В таблице 5 представлены результаты корреляционной обработки ТМ при рассмотренных вариантах ЭМ.

Невысокое значение $R_{\max}$ для случая реконструкции ЭМ из материалов спутниковой съемки, обусловлено низким разрешением спутниковых снимков (СС), взятых из общедоступного ресурса [20]. В случае применения снимков с большим разрешением можно увеличить $R_{\max}$ до приемлемых для инженерных задач значений. Из рисунков 7,

а и б видно, что в случае использования КГС частично решается проблема теней на ЦИ – контуры теней присутствуют на КГС, но имеют меньшие значения яркости точек по сравнению с точками, принадлежащими проекциям высотных объектов сцены. Здесь также следует отметить, что СС для «Яндекс.Карт» делаются с интервалом в доли секунды, поэтому у быстро движущихся объектов даже не совпадают контуры (рисунок 8) [21]. За этот интервал времени спутник значительно смещается.

Таблица 5. Результаты корреляционной обработки ТМ при различных вариантах ЭМ

Вариант ЭМ	Предварительная обработка ЭМ	Значение $R_{\max}$, %
ЭМ (та же траектория БЛА)	–	98
ЭМ (измененная траектория)	Аффинные преобразования	95
ЭМ (из спутниковых снимков)	Аффинные преобразования	67

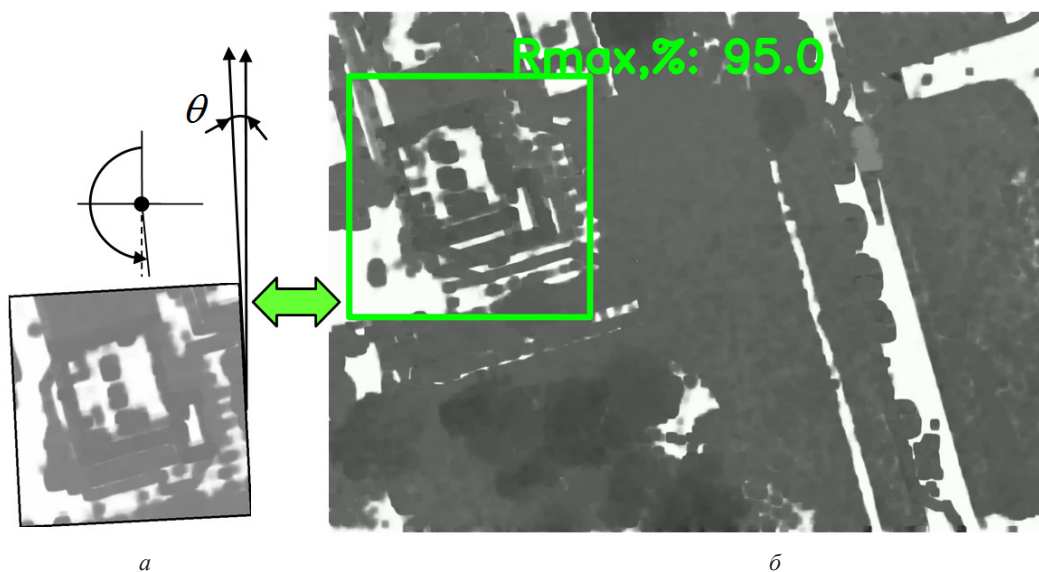


Рисунок 6. Результаты корреляционной обработки ЭМ и ТМ: *а* – исправленная ЭМ; *б* – обработанный кадр ТМ



Рисунок 7. Изображения ННО и соответствующие им ЭМ: *а* – та же траектория полета; *б* – обработанный кадр ТМ; *в* – спутниковый снимок

Данное явление как раз и обеспечивает возможность восстановления КГ из двух смещенных участков «Яндекс.Карты» (СС), сделанных спутником под разным углом.

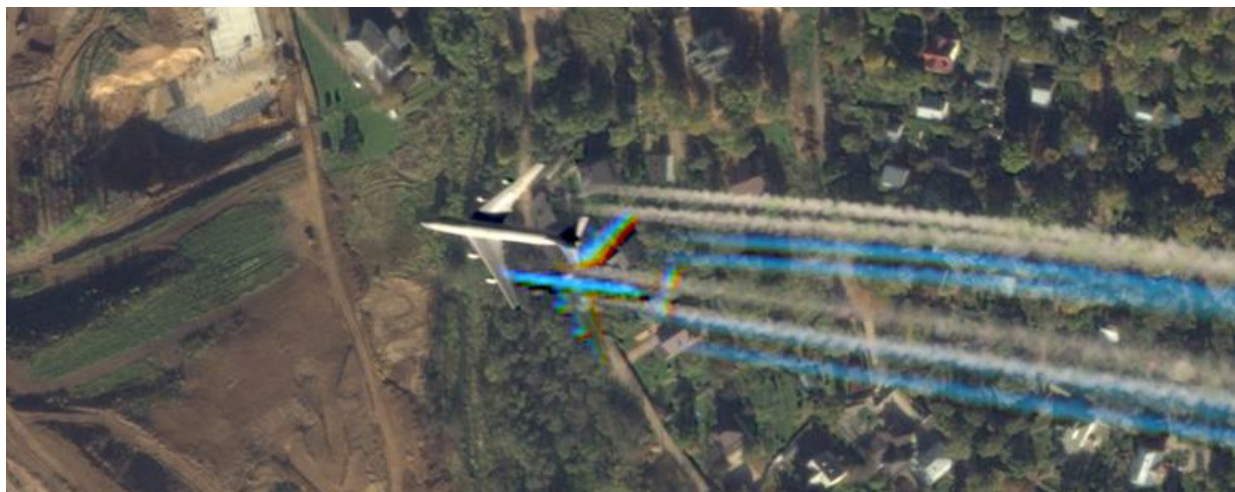


Рисунок 8. СС самолета, сделанный в окрестностях аэропорта

Сравнительный анализ результатов корреляционной обработки видеопотока, в случае применения в качестве эталона СС и трехмерных ЦММ, восстановленных из СС, показал, что применение последних обеспечивает существенно большие значения $R_{\max}$ (таблица 6).

Для обработки видеопотока от БЦК БЛА на основе алгоритмов машинного зрения и рассмотренных математических соотношений было разработано программное обеспечение,

адаптированное под одноплатный компьютер Raspberry Pi 4. Последний широко применяется в качестве бортового вычислителя, в том числе для решения задач навигации и наведения БЛА по видовой информации. Практические исследования показали, что время обработки очередного кадра видеопотока (построение КГС, аффинные преобразования, реконструкция трехмерной ЦММ, корреляционная обработка ЭМ и ТМ) составляет не более 0,9 с.

Таблица 6. Результаты корреляционной обработки при разнородных эталонах

Вариант эталона	Обработка эталона	Значение $R_{\max}$, %
ЦИ (из спутниковых снимков)	Аффинные преобразования	29
ЭМ (из спутниковых снимков)	Аффинные преобразования	67

Заключение

Таким образом, в процессе исследований разработана оптико-электронная КЭНС малого БЛА, отличающаяся применением алгоритмов реконструкции трехмерных ЦММ по воздушным снимкам, а также алгоритмов корреляционной обработки ТМ и ЭМ, что обеспечивает возможность точной АВН малых БЛА по видовой информации. Обоснованы требования к характеристикам

бортовой оптико-электронной системы, к качеству ЭМ и параметрам полета носителя, обеспечивающие максимальную точность предлагаемой КЭНС. Применение разработанной КЭНС обеспечит возможность реализации режима АВН малых БЛА по данным ГИС в условиях плохого приема или подавления сигналов СРНС. Следует также отметить бюджетность предлагаемого технического решения, что актуально для, массово используемых, малых БЛА военного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теодорович, Н.Н. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами / Н.Н.Теодорович, С.М. Строганова, П.С. Абрамов // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Том 9, № 1.
2. Распопов, В.Я. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 2011. – 184 с.
3. Пролетарский, А.В. Способы коррекции навигационных систем и комплексов летательных аппаратов / А.В. Пролетарский, К.А. Неусыпин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2012. – С. 223–216.
4. Матвеев, В.В. Инерциальные навигационные системы / В.В. Матвеев. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – 199 с.

5. **Сырямкин, В.И.** Корреляционно-экстремальные радионавигационные системы. Монография / В.И. Сырямкин, В.С. Шидловский. – Томск: Изд-во Том. ун-та. – 2010. – 315 с.
6. **Костяшкин, Л.Н.** Обработка изображений в авиационных системах технического зрения / Л.Н. Костяшкин, М.Б. Никифоров. – М.: Физматлит, 2016. – 240.
7. **Латкин, В.А.** Трехмерное картографирование местности / В.А. Латкин // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26. – № 2. – С. 133-146.
8. **Тужилкин, А.Ю.** Распознавание и реконструкция 3D-объектов по спутниковым изображениям на основе сравнения спектров графов / А.Ю. Тужилкин // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2. – С. 3727-3732.
9. **Красильщиков, М.Н.** Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / М.Н. Красильщиков [и др.]. – М.: Физматлит, 2009. – 556 с.
10. **Клетте, Р.** Компьютерное зрение. Теория и алгоритмы / пер. с англ. А.А. Сликин. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 506 с.
11. **Козин, Е.В.** Фотограмметрия / Е.В. Козин, А.Г. Карманов, Н.А. Карманова. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 142 с.
12. **Ардентов, А.А.** Алгоритмы вычисления положения и ориентации БПЛА / А.А. Ардентов [и др.] // Программные системы: теория и приложения. – 2012. – Т. 3 – № 3. – С. 23-39.
13. **Шейников, А.А.** Математическая модель ошибок высотомера беспилотного летательного аппарата на базе стереосистемы технического зрения / А.А. Шейников, В.А. Малкин, А.А. Санько, Л.А. Иваницкий // Авиационный вестник. – 2022. – № 7. – С. 68-75.
14. **Елесина, С.И.** Совмещение изображений в корреляционно-экстремальных навигационных системах. Монография / С.И. Елесина, Л.Н. Костяшкин, А.А. Логинов, М.Б. Никифоров. – М.: Радиотехника, 2015. – 204 с.
15. **Коваленко, А.М.** Коррекция ошибок бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата с использованием наземных навигационных ориентиров / А.М. Коваленко, А.А. Шейников // ГУ НИИ ВС РБ «Наука и военная безопасность». – 2020. – № 2(64). – С. 16-22.
16. **Биард, Р.** Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / Р. Биард, Т. Маклэйн. – М.: Техносфера, 2015. – 312 с.
17. **Матвеев, В.В.** Инженерный анализ погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы / В.В. Матвеев // Известия ТулГУ. – 2014. – № 9. – С. 251-267.
18. **Костяшкин, Л.Н.** Совмещение изображений в корреляционно-экстремальных навигационных системах / Л.Н. Костяшкин, М.Б. Никифоров. – М.: Радиотехника, 2015. – 208 с.
19. **Коваленко, А.М.** Модель инерциально-оптической навигационной системы беспилотного летательного аппарата / А.М. Коваленко, А.А. Шейников // Системный анализ и прикладная информатика. – 2020. – № 2. – С. 17-25.
20. **Яндекс Карты:** [Электронный ресурс] // Яндекс. URL: <https://yandex.ru/maps/>. (Дата обращения 02.04.2024).
21. **Технологии. Спутниковые снимки на Яндекс.Картах:** [Электронный ресурс] // Компания Яндекс. URL: <https://yandex.ru/company/technologies/satellite/>. (Дата обращения 02.04.2024).

REFERENCES

1. **Teodorovich, N.N.** Methods of detecting and combating small-sized unmanned aerial vehicles / N.N. Teodorovich, S.M. Stroganova, P.S. Abramov // Internet journal "Science Studies". 2017. Vol. 9, No. 1.
2. **Raspopov, V.Ya.** Microsystems of orientation of unmanned aerial vehicles. – М.: Mashinostroenie, 2011. 184 p.
3. **Proletarsky, A.V.** Methods for correcting navigation systems and aircraft complexes / A.V. Proletarsky, K.A. Neusypin // Bulletin of MSTU named after. N.E. Bauman. Ser. "Instrument Engineering". – 2012. – Pp. 223-216.
4. **Matveev, V.V.** Inertial navigation systems / V.V. Matveev. – Tula: Tula State University Publishing House, 2012. 199 p.
5. **Syryamkin, V.I.** Correlation-extreme radio navigation systems. Monograph / V.I. Syryamkin, V.S. Shidlovsky. – Tomsk: Publishing house Tom. Univ., 2010. – 315 p.
6. **Kostyashkin, L.N.** Image processing in aviation vision systems / L.N. Kostyashkin, M.B. Nikiforov. – М.: Fizmatlit, 2016. – 240 p.
7. **Latkin, V.A.** Three-dimensional mapping of terrain / V.A. Latkin // Bulletin of SGUGiT. – 2021. – Vol. 26. – No. 2. – Pp. 133-146.
8. **Tuzhilkin, A.Yu.** Recognition and reconstruction of 3D objects from satellite images based on comparison of graph spectra / A.Yu. Tuzhilkin // Fundamental research. – 2015. – No. 2. – Pp. 3727-3732.
9. **Krasilshchikov, M.N.** Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned maneuverable aerial vehicles / M.N. Krasilshchikov [and others]. – М.: Fizmatlit, 2009. – 556 p.
10. **Klette, R.** Computer vision. Theory and algorithms / trans. from English A.A. Slickin. – М.: DМК Press, 2019. 506 p.
11. **Kozin, E.V.** Photogrammetry / E.V. Kozin, A.G. Karmanov, N.A. Karmanova. – St. Petersburg: ITMO University, 2019. 142 p.

12. **Ardentov, A.A.** Algorithms for calculating the position and orientation of UAVs / A.A. Ardentov [et al.] // Software systems: theory and applications. – 2012. – Vol. 3 – No. 3. – Pp. 23-39.
13. **Sheynikov, A.A.** Mathematical model of errors in the altimeter of an unmanned aerial vehicle based on a stereo vision system / A.A. Sheynikov, V.A. Malkin, A.A. Sanko, L.A. Ivanitsky // Aviation Bulletin. – 2022. – No. 7. – Pp. 68-75.
14. **Elesina, S.I.** Combination of images in correlation-extremal navigation systems. Monograph / S.I. Elesina, L.N. Kostyashkin, A.A. Loginov, M.B. Nikiforov. – M.: Radio engineering, 2015. – 204 p.
15. **Kovalenko, A.M.** Error correction of a strapdown inertial navigation system of an unmanned aerial vehicle using ground-based navigation landmarks / A.M. Kovalenko, A.A. Sheynikov // State Research Institute of the Armed Forces of the Republic of Belarus "Science and Military Security". – 2020. – No. 2(64). – Pp. 16-22.
16. **Biard, R.** Small unmanned aerial vehicles: theory and practice / R. Biard, T. McLane. – M.: Tekhnosphere, 2015. 312 p.
17. **Matveev, V.V.** Engineering analysis of errors in a strapdown inertial navigation system / V.V. Matveev // News of Tula State University. – 2014. – No. 9. – Pp. 251-267.
18. **Kostyashkin, L.N.** Combination of images in correlation-extremal navigation systems / L.N. Kostyashkin, M.B. Nikiforov. – M.: Radio engineering, 2015. – 208 p.
19. **Kovalenko, A.M.** Model of an inertial-optical navigation system for an unmanned aerial vehicle / A.M. Kovalenko, A.A. Sheynikov // System analysis and applied informatics. – 2020. – No. 2. – Pp. 17-25.
20. **Yandex Maps:** [Electronic resource] // Yandex. URL: <https://yandex.ru/maps/>. (Date of access: 04/02/2024).
21. **Technologies. Satellite images on Yandex.Maps:** [Electronic resource] // Yandex Company. URL: <https://yandex.ru/company/technologies/satellite/>. (Date of access: 04/02/2024).

SHEINIKOV A.A., MALKIN V.A., SMOLENSKY E.A., IVANITSKY L.A.

OPTICAL-ELECTRONIC CORRELATION-EXTREME NAVIGATION SYSTEM OF SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLE

*Educational institution "Military Academy of the Republic of Belarus"
Minsk, Republic of Belarus*

An optical-electronic correlation-extreme navigation system for an unmanned aerial vehicle has been developed. The proposed navigation system is characterized by the use of a small-sized and affordable digital camera and computer, which is critical for small military unmanned aerial vehicles. The developed algorithmic support for the system is distinguished by the use of algorithms for reconstructing a three-dimensional digital terrain model using optical digital images from an on-board digital camera, as well as algorithms for correlation processing of current and reference models, which ensures the possibility of accurate autonomous air navigation using view information. The requirements for the flight parameters of a small unmanned aerial vehicle with an optical-electronic correlation-extreme navigation system are substantiated. The values of the true speed of an unmanned aerial vehicle and the correction period of the on-board strapdown inertial navigation system are substantiated according to the data of the proposed optical-electronic correlation-extreme navigation system. The results of the developed optical-electronic correlation-extremal navigation system accuracy studies depending on the shooting parameters and the quality of the reference models are presented.

Keywords: *technical vision system, optical-electronic correlation-extreme navigation system, three-dimensional terrain model, photogrammetry*



Шейников Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент, докторант учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Почтовый адрес: 220057 г. Минск, пр-т Независимости, 220.

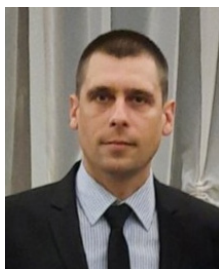
Sheinikau Aliaksei, candidate of technical sciences, associate professor, doctoral student of the educational institution "Military academy of the Republic of Belarus". Postal address: 220057 Minsk, Independence Ave., 220. Area of scientific interests – methods of analysis and synthesis of unmanned aerial vehicles navigation systems

E-mail: af.varb.ao@gmail.com



Малкин Виталий Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры авиационных радиоэлектронных систем авиационного факультета учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Область научных интересов – методы анализа и синтеза систем автоматического управления летательных аппаратов.

Malkin Vitaliy, doctor of technical sciences, professor, professor of the aviation radio-electronic systems department of the aviation faculty of the educational institution "Military academy of the Republic of Belarus". Area of scientific interests – methods of analysis and synthesis of aircraft automatic control systems.



Смоленский Эдуард Анатольевич, начальник цикла кафедры авиационных радиоэлектронных систем авиационного факультета учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Почтовый адрес: 220057 г. Минск, пр-т Независимости, 220. Область научных интересов — методы анализа и синтеза навигационных комплексов беспилотных летательных аппаратов.

Smolensky Eduard, cycle head of the aviation radio-electronic systems department of the aviation faculty of the educational institution "Military academy of the Republic of Belarus". Postal address: 220057 Minsk, Independence Ave., 220. Area of scientific interests – methods of analysis and synthesis of unmanned aerial vehicles navigation systems.

E-mail: Smolenskiy1989@bk.ru



Иваницкий Леонид Александрович, адъюнкт учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Почтовый адрес: 220057 г. Минск, пр-т Независимости, 220. Область научных интересов — методы анализа и синтеза навигационных комплексов беспилотных летательных аппаратов.

Ivanitsky Leonid, graduate student of the educational institution "Military academy of the Republic of Belarus". Postal address: 220057 Minsk, Independence Ave., 220. Area of scientific interests – methods of analysis and synthesis of unmanned aerial vehicles navigation systems.

E-mail: leonid210785@mail.ru

AN ALGORITHM AND A PROGRAM FOR CONFIGURING RISOGRAPHIC PRINTING, TAKING INTO ACCOUNT THE PRINTING PROPERTIES OF PAPER

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

The widespread use of risograph printing in printing houses requires an increase in the speed of equipment while maintaining the printing quality of the original layouts. The problem of risograph printing is not always obtaining high-quality images, since the risographs used in the standard driver (periodic, non-periodic) do not always allow you to get the printed image the same as in the original. This is reflected in the insufficiency of parameters such as image clarity and sharpness. Problems of poor quality of risograph printing can be solved by changing the settings of the risograph driver for the original layout with additional use of digital filtering and image rasterization. This will require the creation of additional image rasterization methods to improve the initial indicators of the original layout in contrast, clarity, and the correctness of the transmission of halftone images and will improve the quality of printed images, as well as ensure the efficiency of the printing process for a wide range of original layouts.

Keywords: risograph printing, original layout, rasterization, digital filtering, grayscale image

Introduction

The selection of paper for printing on a risograph requires the use of certain qualities of the paper medium, as well as subsequent evaluation of the prints obtained. To control the quality of the printed risograph impression obtained, it is advisable to conduct a comparative printing of the original layout on a laser printer, the printing technology of which has high quality indicators.

The Main Part

Paper is porous-capillary sheets consisting mainly of plant fibers, firmly interconnected by chemical hydrogen bonds. Thus, printed paper for books differs from writing paper, packaging paper and other types of paper in that it must not only have good consumer qualities, but also meet the specific requirements of the printing process. Along with paper, other types of paper are often used for making books – newspaper, cartographic, writing and others.

Paper is different for different printing methods and type of printed products.

Basic materials for making paper:

- wood pulp;
- cotton mass;
- fiber-free materials (fillers, etc.).

Classification of printed paper:

– according to the production method, when the significant feature is the content of the paper layer: uncoated and coated (table 1.1):

– according to the finishing the surface of the paper when the paper is cast or after additional processing: matte and glazed;

– according to the fibrous composition of the paper layer itself, depending on the raw material: pure cellulose papers and papers containing wood pulp. The wood pulp gives the paper a number of useful properties: the printing properties are improved, dimensional stability is maintained, and the density of the sheet decreases;

– according to the printing method: paper for high (in particular flexographic), offset and gravure printing. In addition, if necessary, paper intended for other printing methods is used. For example, flexography and screen printing do not impose special requirements on paper, and these methods can be printed on all papers designed for both high and offset printing. Offset papers are suitable for almost all printing methods, so they are also used in operational printing, namely in printing on laser and inkjet printers, as well as on a risograph;

– according to printed or other special properties, papers are divided into types, grades and brands, denoted by letters and numbers, sometimes by brand names, for example, with watermarks, colored paper, label paper, embossed [1].

Table 1.1. Characteristics of uncoated and coated papers

Uncoated paper	Coated paper
it has no coverage	it is coated with minerals
cheap	dear
loose surface	smooth surface
less shiny	more brilliant
absorbent	dense
poor surface quality	better surface quality
it has a fragile surface	It has a solid surface

The variety of printed products produced determines the existence of a considerable number of types of paper:

- offset (production of book products, magazines, flyers, newspaper printing);
- printing (books and brochures);
- newspaper (brochures, books, newspapers);
- coated (printing booklets, business cards, flyers, creating catalogs, magazines, book covers and brochures);
- writing (notebooks, notebooks,);
- design (business cards, invitations, representative products);
- barite paper (photo paper);
- packaging (durable kraft paper) [1].

Here are the characteristics of some types of paper:

- newsprint mainly consists of mechanical wood pulp (at least 85 %), which is why after a certain time it turns yellow and becomes brittle. Its density, which is determined by the mass of 1 m² in grams, ranges from 30 to 52 g/m²;
- printing paper number 1 (80-100 % bleached cellulose – vegetable fibers dissolved in water) of machine smoothness. It is intended for printing text and line-based visual materials;
- printing paper number 2 (25-50 % bleached pulp, up to 50 % wood pulp) machine smoothness, designed to reproduce textual and line-based visual materials;
- calendered paper for publications with halftone illustrations;
- book and magazine paper for offset printing (with a mixed structure, with wood particles). The weight ranges from 60 g/m² to 80 g/m². It is recommended for printing monochrome editions;
- offset paper (100 % bleached or sulphated cellulose) of machine smoothness is multipurpose and is used for printing newspapers, magazines, books, textbooks, etc. The paper density usually ranges from 60 g/m² to 220 g/m². Offset paper can be made with partial mechanical grinding and does not contain wood pulp. A distinctive feature of offset paper is its resistance to a moisturizing solution – this is achieved by an increased degree of sizing. There are many varieties of offset paper, among which there are calendered and super-calendered varieties;
- coated paper consists of a base layer coated on one or both sides with a chalk layer, which gives it increased brightness and smoothness.

To obtain printed products of optimal quality, it is important to take into account various factors, namely: the correct choice of consumables and prepress processes corresponding to this parameter.

The right choice of paper is determined by the type of publication: textile fibers are stronger than wood fibers, but, on the other hand, paper with a higher proportion of

wood pulp is much cheaper. Choosing paper obtained from waste paper, you can save significantly, but this is justified only if the consumer uses the publication for a relatively short time, since the recycled fibers do not have sufficient length for a strong bond [2].

There are also groups of indicators of the properties of printed paper:

- composition;
- dimensional and weight indicators;
- external characteristics;
- mechanical properties;
- surface character and deformation properties;
- porosity, wettability and absorbency;
- optical properties.

To ensure high quality of printed products, printed paper must have a certain set of properties, such as smoothness, softness, stiffness, dustiness. However, during risograph printing on hard papers, indistinct reproduction occurs, as well as hard papers lead to mechanical damage to the mesh of the mold cylinder of the risograph. The paper used for risograph printing must have the ability to perceive the ink and hold it on its surface. This is ensured by the ability of the paper to be wetted with paint, as well as absorb it into the pores. The absorbency of the paper is especially important when printing with paints used in risography, since the ink is fixed on the impression due to its absorption into the pores of the paper. Only in this case, the paint is fixed on the impression and dries. The absorbency of the paper depends on the type of fiber mass, porosity of the paper, filler, composition and type of sizing, as well as the physical properties of the absorbent paint components [4].

To characterize the absorbency of paper, a number of methods have been proposed based on measuring the rate of absorption of solvents or measuring the amount of ink retained by paper. Being in a humid atmosphere, the paper absorbs water. In this case, the cellulose fibers swell, as a result of which the paper sheet deforms when moistened. Deformation of the sheet can lead to a mismatch of colors in multicolored printing. Therefore, an important technological property is the deformation of the paper during humidification. The considered paper properties are also determined using special devices. The optical properties of the paper determine the appearance of the printed product and the image quality. Optical properties include opacity, whiteness, color and gloss of the paper [3].

The paper must be light-proof so that the image printed on the reverse side does not shine through. Therefore, transparent papers can only be printed on one side. Light transmission decreases with increasing paper thickness and the introduction of fillers.

The high whiteness of the paper provides a sharp, contrasting image perception. Whiteness is ensured by the selection of the appropriate fibrous material, bleaching of the semi-finished product, the introduction

of fillers and dyes. The paper is usually white in color, but colored paper grades are also used in offices.

The surface of the paper can be matte or shiny, which affects the appearance and quality of printed products. The optical properties of paper can be tested on visual cameras or other devices that measure transmittance, reflection, or optical density with high accuracy.

The adjustment of the original layout for risograph printing in terms of clarity, sharpness, and noise is carried out by using standard filters according to the scheme (Figure 1) and using specialized filters in accordance with the scheme (Figure 2). As a result of image processing of the original layouts, the light points of the image contours are illuminated and the dark ones are darkened, which improves the clarity of the image contour. To eliminate the complex of disadvantages for the original layout, it is necessary to use two types of filters (standard and specialized) [4].

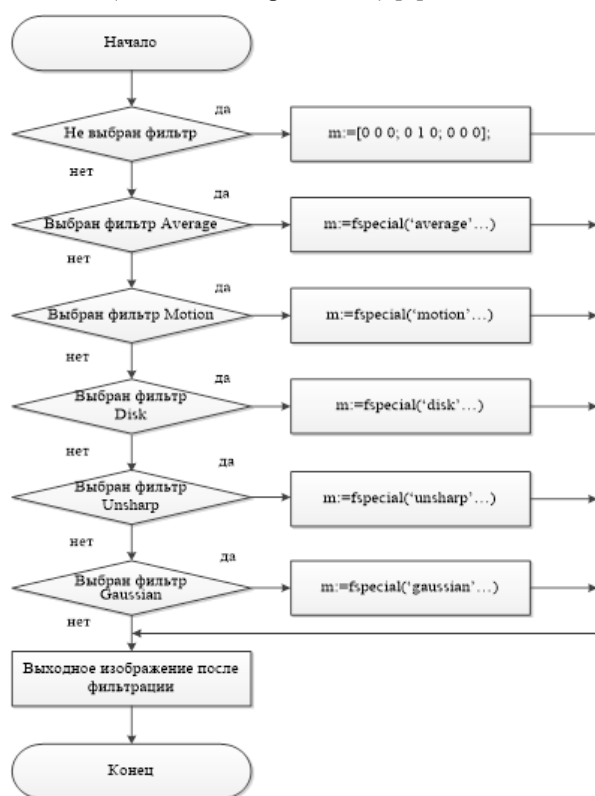


Figure 1. Block diagram of the algorithm for applying a standard filter

It has been experimentally revealed that obtaining a high-quality impression of a digital image on a risograph is often hindered by defects in contrast and clarity. It is also necessary to adjust the brightness alignment of the image in accordance with the flowchart (Figure 3).

To do this, the software provides two tools: manual and automatic brightness correction. The automatic brightness correction function is enabled by checking the box in the optimal brightness program.

The first step of the automatic brightness correction algorithm is to calculate the average brightness of the image points. This brightness is compared with the optimal brightness. The brightness of 127 units is accepted as optimal. If the brightness of the image is higher than the optimal brightness, then the difference between them is subtracted from the brightness of each point in the image, except for the black dots. Otherwise, the difference between the average brightness of the image and the optimal brightness is added to the brightness of each point in the images, except for the white dots.

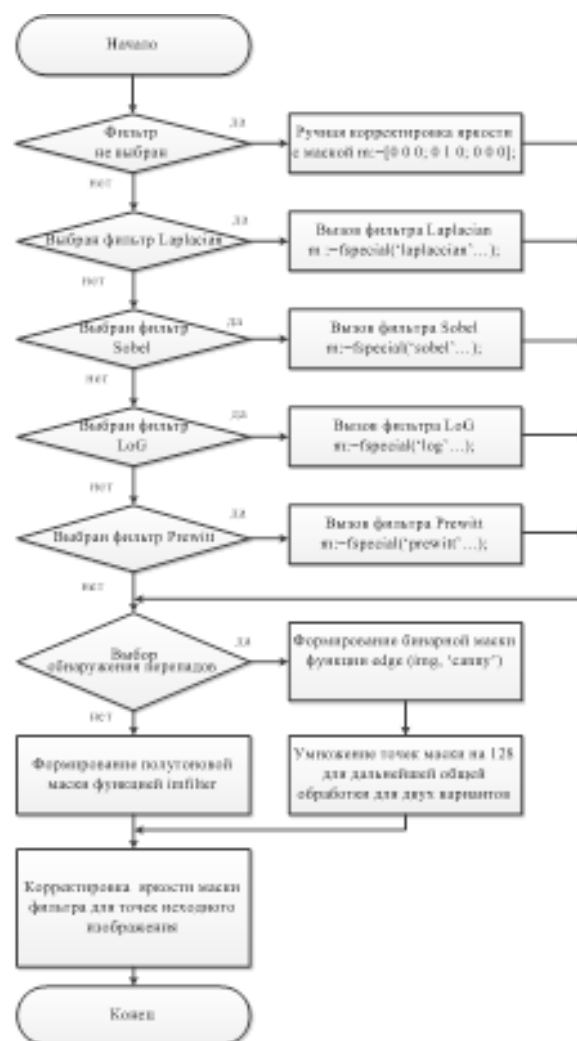


Figure 2. Block diagram of the algorithm for applying a specialized filter

To adjust the contrast of the original layout image, the software product is controlled based on the Adjust Contrast tool. The diagram of the dialog box is shown in Figure 4.

After launching the Adjust Contrast tool, a window opens with an image histogram. It shows ranges of image and display data. The range of image data conveys the existing coverage of the intensity values of the elements.

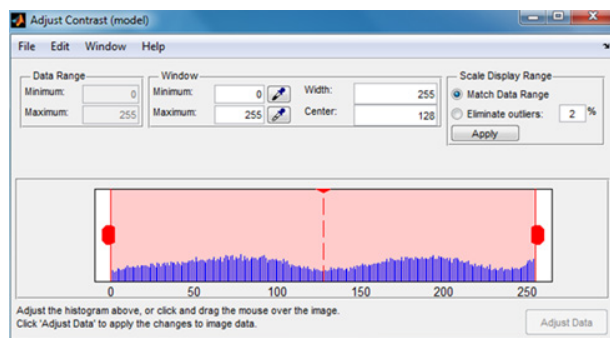


Figure 4. Adjust Contrast tool dialog box

The display range provides information about the maximum possible coverage of the original layout image. The histogram of the original layout is presented in uint8 format in the dynamic range from 0 to 255. There is a red rectangular area above the histogram, which adjusts the contrast of the original.

The Adjust Contrast tool application improves the image without changing the pixel values. The imadjust function is used to change the intensity values.

The next step in improving the quality of risographic printing is the additional use of adaptive image rasterization [4].

Conclusions

Algorithms for the automated application of combined filtering have been developed, including primary processing of the original image by linear filtration and secondary processing by nonlinear filtration; operation of linear filters; operation of nonlinear filters; brightness and contrast settings. Based on the obtained algorithms, a program for forming the print profile of the original layout for the risograph has been developed.

REFERENCES

1. **Sulim, P.E., Yudenkov V.S.** Analysis of types and properties of printed papers, requirements for paper for risographs. Printtechnologies and media communications : materials of the 86th scientific and technical conference of faculty, researchers and postgraduates, Minsk, January 31 – February 12, 2022. Minsk : BSTU, 2022. Pp. 56-57.
2. **Sitnikov, V.P.** Technique and technology of mass media: print, television, radio broadcasting. M.: Eksmo, 2004. 416 p.
3. **Sulim, P.E., Yudenkov V.S.** Investigation of the influence of paper parameters on the quality of risographic printing. System analysis and applied informatics. Minsk, 2020. No. 1. Pp. 11-16.
4. **Sulim, P.E., Yudenkov V.S.** Intelligent module for risographic equipment. The future of machine building in Russia : sat. tr. Seventh All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists, Moscow, September 24-27, 2014. Moscow : Bauman Moscow State Technical University, 2014. Pp. 451-453.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сулим, П.Е.** Анализ видов и свойств печатных бумаг, требования к бумаге для ризографов / П.Е. Сулим, В. С. Юденков // Принттехнологии и медиакоммуникации : материалы 86-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 31 января – 12 февраля 2022 г. – Минск: БГТУ, 2022. – С. 56-57.
2. **Ситников В.П.** Техника и технология СМИ: печать, телевидение, радиовещание. – М.: Эксмо, 2004. – 416 с.
3. **Сулим, П.Е.** Исследование влияния параметров бумаги на качество ризографической печати / П.Е. Сулим, В.С. Юденков // Системный анализ и прикладная информатика. – Минск, 2020. – № 1. – С. 11-16.
4. **Сулим, П.Е.** Интеллектуальный модуль для ризографического оборудования / П.Е. Сулим, В.С. Юденков // Будущее машиностроения России : сб. тр. Седьмой Всерос. конф. молодых ученых и специалистов, Москва, 24–27 сент. 2014 г. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – С. 451-453.

ЮДЕНКОВ В.С., СУЛИМ П.Е.

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА НАСТРОЙКИ РИЗОГРАФИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ С УЧЕТОМ ПЕЧАТНЫХ СВОЙСТВ БУМАГИ

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Широкое применение ризографической печати в типографиях требует повышения быстродействия оборудования с соблюдением качества печати исходных оригинал-макетов. Проблемой ризографической печати является получение не всегда качественных изображений, так как используемые в штатном драйвере ризографа два типа растривания (периодический, непериодический) не всегда позволяют получить напечатанное изображение таким, как в оригинале. Это выражается в недостаточности таких параметров, как четкость и резкость изображения. В то же время проблемы низкого качества ризографической печати можно решить путем изменения настроек драйвера ризографа для оригинал-макета с дополнительным использованием цифровой фильтрации и растриванием изображения. Это потребует создания дополнительных способов растривания изображения для улучшения исходных показателей оригинал-макета по контрастности, четкости, корректности передачи полутоновых изображений и позволит повысить качество печатных изображений, а также обеспечить эффективность печатного процесса для широкого круга оригинал-макетов.

Ключевые слова: ризографическая печать, оригинал-макет, растривание, цифровая фильтрация, полутоновое изображение



Yudenkov Victor is a PhD (Engineering), Assistant Professor. The Department of Software of Information Systems and Technologies. Belarusian National Technical University.



Sulim Pavel is a PhD (Engineering), senior lecturer, the Department of Printing Equipment and Information Processing Systems. Belarusian State Technological University.

**ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**

**DATA PROCESSING
AND
DECISION-MAKING**

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ В СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Военная академия Республики Беларусь
г. Минск, Республика Беларусь

В статье рассмотрено содержание этапов имитационного моделирования, которые предусматривают построение логико-математической модели исследуемой системы, разработку моделирующего алгоритма, описывающего процесс ее функционирования, разработку программы, реализующей этот алгоритм и проведение экспериментов с имитационной моделью. Приведено описание реализации принципов имитационного моделирования в системе поддержки принятия решений при организации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), включающей имитационные модели космического аппарата и наземного объекта. Рассмотрены особенности реализации в моделирующем алгоритме случайного выбора режимов ДЗЗ космического аппарата, наземных объектов для дистанционного зондирования, имитации события «разрешение объекта».

Ключевые слова: моделирование, имитационная модель, моделирующий алгоритм, имитация случайного события, система поддержки принятия решений, дистанционное зондирование Земли

Введение

Одним из наиболее широко применяемых способов моделирования сложных систем является имитационное моделирование.

Имитационная модель – это компьютерная программа, которая описывает структуру и воспроизводит поведение реальной системы во времени [1].

Цель имитационного моделирования состоит в воспроизведении поведения исследуемой системы для оценки ее эффективности.

Процесс имитационного моделирования предполагает выполнение следующих этапов [2]:

- построение логико-математической модели исследуемой системы;
- разработка моделирующего алгоритма функционирования системы;
- программирование имитационной модели (ИМ);
- исследование системы с помощью ее ИМ.

Содержание этапов имитационного моделирования

Логико-математической моделью системы называется ее упрощенное математическое описание, порядок построения которой включает в себя следующее:

- анализ системы, т.е. ее декомпозиция, допускающая удобное математическое описание и определение связей между элементами;
- определение параметров, переменных и пространства состояний системы, установление областей их изменения;

- выбор показателей эффективности;
- динамическое описание системы, т.е. описание процесса взаимодействия ее элементов между собой и с внешней средой;
- проверка адекватности логико-математической модели.

Моделирующий алгоритм описывает последовательность действий системы в процессе ее функционирования посредством формирования последовательности ее состояний (фазовой траектории) в соответствии с определенными правилами [2].

Реализация этого этапа начинается с выбора способа имитации системы (способа формирования ее фазовой траектории). Выделяют следующие способы имитации системы [3]:

- *событийный* – фиксирование моментов наступления событий в системе;
- *просмотр активностей* – анализ выполнения действий в системе, на осуществление которых требуются затраты времени;
- *процессный* – выполнение всей хронологической последовательности событий и действий, называемой *процессом*.

Далее выполняется формализация модели: запись математических соотношений, описывающих поведение элементов системы. При этом следует учитывать, что на функционирование системы, как правило, оказывают влияние различные случайные факторы. Условия и параметры функционирования системы также могут носить случайный характер.

Если логико-математическая модель системы не содержит случайных элементов, т.е. стохастичность системы отсутствует или ею можно

пренебречь, то в результате будет получена *детерминированная* модель, в противном случае – *вероятностная* модель.

При разработке детерминированных моделей используют математический аппарат дифференциальных (интегро-дифференциальных) уравнений, при разработке вероятностных моделей – метод статистического моделирования (метод статистических испытаний, метод Монте-Карло) [4].

Так как моделируемая система функционирует во времени, то необходимо определить порядок изменения значений переменных, определяющих ее состояния, т. е. динамику изменения фазовой траектории. Этот процесс в ИМ реализуется с помощью механизма формирования модельного времени.

Существует два способа формирования модельного времени, известные как принципы организации изменения модельного времени [5, 6]:

«принцип Δt » – изменение модельного времени с фиксированным шагом Δt ;

«принцип Δx » – изменение модельного времени при скачкообразном изменении вектора состояний системы на некоторую величину Δx .

Такие изменения состояния системы происходят при наступлении так называемых «особых» событий: поступление управляющих сигналов и внешних воздействий, выдача выходных сигналов и т. д.

Перед программированием реализуется формально-словесное или блок-схемное представление моделирующего алгоритма.

Программирование ИМ включает в себя следующее:

- выбор вычислительных и программных средств реализации ИМ;
- разработка программного интерфейса;
- кодирование моделирующего алгоритма на алгоритмическом языке;
- тестирование и отладка программы ИМ.

Исследование системы с помощью ее ИМ включает:

- планирование и проведение имитационных экспериментов;
- обработка и анализ результатов;
- выводы о поведении реальной системы;
- оценку адекватности ИМ.

Планированием имитационного эксперимента называется процесс задания значений параметров системы, используемых при моделировании. Выбор этих значений определяется целью имитационного эксперимента.

Имитационный эксперимент с ИМ системы, в результате которого для заданных значений параметров системы имитируется ее фазовая траектория, и вычисляются показатели эффективности, называется прогоном ИМ.

В результате одного прогона ИМ получают случайные значения показателей эффективности.

По одной случайной реализации показателя эффективности нельзя судить об эффективности функционирования системы, поэтому на данном этапе осуществляется несколько прогонов, в результате которых получается случайная выборка значений показателя эффективности.

Описание имитационных моделей в СППР при организации ДЗЗ

Рассмотрим особенности реализации принципов имитационного моделирования в разработанной системе поддержки принятия решений (СППР) при организации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [7].

Составляющими СППР, которые реализуют имитацию процесса ДЗЗ являются имитационные модели космического аппарата (КА) и наземного объекта.

Для имитации процессов ДЗЗ в СППР осуществляется формирование модельного времени по «принципу Δt », то есть изменение значений модельного времени осуществляется с постоянным шагом. Шаг изменения модельного времени задается оператором СППР в модуле формирования исходных данных.

При проведении имитационного эксперимента осуществляется несколько прогонов СППР. Прогон предусматривает реализацию моделей КА, наземного объекта и расчета показателей достоверного разрешения объекта на каждый момент модельного времени. Прогон завершается по достижении модельным временем значения установленного интервала прогнозирования.

По окончании прогона осуществляется расчет математического ожидания числа разрешенных объектов с помощью следующего соотношения:

$$M_{\text{разр.}} = \sum_{i=1}^{NZ} \frac{K_{\text{разр.}i}}{K_{\text{попад.}i}},$$

где NZ – количество объектов, каждый из которых хотя бы один раз попал в зону ДЗЗ КА;

$K_{\text{разр.}i}$ – суммарное количество наступлений события «разрешение i -го объекта»;

$K_{\text{попад.}i}$ – суммарное количество попаданий i -го объекта в зону ДЗЗ.

Значение математического ожидания числа разрешенных объектов используется в качестве интегрального показателя эффективности процесса ДЗЗ.

Функционирование данной СППР основано на процессном способе имитации, заключающемся в просмотре активности ИМ КА и регистрации событий, происходящих в ИМ наземного объекта. Под активностью модели КА понимаются действия, связанные с имитацией движения КА и формированием их зон ДЗЗ.

Активность модели КА приводит к наступлению следующих событий в модели наземного объекта: попадание наземного объекта в зону ДЗЗ, выход объекта из зоны ДЗЗ.

В ИМ наземного объекта фиксируются моменты времени наступления этих событий, рассчитываются время пребывания объекта в зонах ДЗЗ и кратность попадания в них, осуществляется отображение на электронной карте местности (ЭКМ) значка наземного объекта, маршрута передвижения мобильного объекта.

В связи с отсутствием необходимости имитации случайных событий ИМ наземного объекта является детерминированной.

В ИМ КА для текущего значения модельного времени осуществляется расчет прямоугольных координат подспутниковой точки, отображение ее на ЭКМ, расчет прямоугольных координат границ зоны ДЗЗ, отображение зоны на ЭКМ, отображение значений показателей попадания наземных объектов в зоны ДЗЗ для каждого КА.

ИМ КА является вероятностной, т. к. в ней осуществляется случайный выбор режима и типа ДЗЗ, наземных объектов для дистанционного зондирования, имитация события «разрешение объекта».

Рассмотрим особенности имитации этих событий в моделирующем алгоритме рассматриваемой СППР.

Имитация выбора режима и типа ДЗЗ

Для имитации выбора режима и типа ДЗЗ осуществляется розыгрыш двух дискретных случайных величин (ДСВ): «номер режима ДЗЗ» и «номер типа ДЗЗ», каждая из которых может принять значение из множества $\{1; 2; 3\}$. Словесное описание режимов, соответствующих значениям этих ДСВ представлено в таблице 1.

Таблица 1. Описание значений ДСВ

Номер ДСВ	Название ДСВ	Значения ДСВ и их описание		
		1	2	3
1	номер режима ДЗЗ	режим 1	режим 2	режим 3
2	номер типа ДЗЗ	тип 1	тип 2	тип 3

Ряд распределения вероятностей этих ДСВ определяется оператором в модуле формирования исходных данных в виде следующей таблицы:

Таблица 2. Ряд распределения вероятностей ДСВ

Номер ДСВ	Значения ДСВ		
	1	2	3
1	P_{11}	P_{12}	P_{13}
2	P_{21}	P_{22}	P_{23}

В ИМ КА осуществляется контроль введенных значений: сумма значений вероятностей в каждой из строк таблицы 2 должна быть равна 1.

Пример заполнения таблицы распределения вероятностей рассматриваемых ДСВ при равновесном включении режимов ДЗЗ и преимущественном включении ДЗЗ типа 1 или типа 2 представлен в таблице 3.

Таблица 3. Пример распределения вероятностей ДСВ

Номер ДСВ	Значения ДСВ		
	1	2	3
1	0,34	0,33	0,33
2	0,4	0,4	0,2

Розыгрыш ДСВ осуществляется следующим образом. Розыгрывается значение базовой случайной величины α [3, 5], которая имеет равномерное распределение на $[0; 1)$. Далее значение искомой дискретной случайной величины R_i рассчитывается в соответствии со следующим выражением:

$$R_i = \begin{cases} 1, & \text{если } \alpha < P_{i1} \\ 2, & \text{если } P_{i1} \leq \alpha < P_{i1} + P_{i2} \\ 3, & \text{если } P_{i1} + P_{i2} \leq \alpha < P_{i1} + P_{i2} + P_{i3} \end{cases}, \quad i \in \{1; 2\},$$

где i – номер ДСВ.

Например, для последней строки таблицы 3 данное выражение будет выглядеть следующим образом:

$$R_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } \alpha < 0,4 \\ 2, & \text{если } 0,4 \leq \alpha < 0,8 \\ 3, & \text{если } 0,8 \leq \alpha < 1 \end{cases}.$$

Имитация выбора наземного объекта для режима 3 ДЗЗ и события «разрешение объекта»

Выбор объекта для режима 3 ДЗЗ осуществляется с учетом важности объекта. На этапе формирования множества наземных объектов ЛПР задает значение коэффициента важности для каждого объекта.

Предположим, что выбор любого из N объектов, находящихся в пределах доступности зоны режима 3 ДЗЗ, является достоверным событием. Обозначим вероятность противоположного ему события $P_{\text{выб.0}}$. Таким образом, $P_{\text{выб.0}} = 0$.

Выполним нумерацию указанных объектов по порядку от 1 до N . Вероятность выбора i -го объекта для режима 3 ДЗЗ ($P_{\text{выб.}i}$) определим как долю значения его важности в общей важности этих объектов:

$$P_{\text{выб.}i} = \frac{K_{\text{важ.}i}}{\sum_i K_{\text{важ.}i}}, \quad i = \overline{1, N}, \quad K_{\text{важ.}i} \in (0; 1],$$

где $K_{\text{важ.}i}$ – коэффициент важности i -го наземного объекта; N – количество объектов, находящихся в пределах доступности зоны режима 3 ДЗЗ.

Розыгрыш номера объекта, выбираемого для режима 3 осуществляется с использованием выражения логики предикатов:

$$\forall i \in [1; N-1]: \sum_{j=0}^i P_{\text{выб.}j} \leq \alpha < \sum_{j=0}^{i+1} P_{\text{выб.}j} \rightarrow N_D = i,$$

где N_D – номер объекта, выбранного для режима 3 ДЗЗ.

Розыгрыш события «разрешение объекта» осуществляется следующим образом: если $\alpha < P_{\text{разр.}i,j}$, то событие произошло, иначе – не произошло ($P_{\text{разр.}i,j}$ – вероятность разрешения i -го объекта бортовым оборудованием j -го КА).

Событие «разрешение объекта» разыгрывается при наступлении события «выход объекта из зоны ДЗЗ».

Заключение

Имитационное моделирование является одним из методов анализа сложных систем. Оно позво-

ляет строить модели, описывающие процессы так, как они проходили бы в действительности. Имитационное моделирование позволяет имитировать поведение системы во времени, реализуя при этом изменение модельного времени как с постоянным шагом («принцип Δt ») так и переменным («принцип Δx »).

Использование «принципа Δt » в имитационных моделях СППР, рассмотренной в статье позволяет проводить имитационный эксперимент в графическом режиме с отображением на ЭКМ наземных объектов, подспутниковых точек КА и зон ДЗЗ. Это дает возможность создания различных тактических ситуаций на заданные моменты времени и визуального контроля моделируемых событий.

В связи с отсутствием информации о режимах работы КА в моделирующем алгоритме ИМ КА реализован вероятностный характер имитации различных событий с использованием метода статистических испытаний. Это позволило повысить адекватность этой модели в частности и СППР в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эльберг, М.С. Имитационное моделирование: учеб. пособие / М.С. Эльберг, Н.С. Цыганков. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – 128 с.
2. Акопов, А.С. Имитационное моделирование : учебник и практикум для академического бакалавриата / А.С. Акопов – М.: Юрайт, 2017. – 389 с.
3. Харин, Ю.С. Математические и компьютерные основы статистического моделирования и анализа данных : учеб. пособие / Ю.С. Харин, В.И. Малюгин [и др.] – Минск : Белорус. гос. ун-т, 2008. – 455 с.
4. Некрасов, К.А. Метод Монте-Карло на графических процессорах: учеб. пособие / К.А. Некрасов, С.И. Поташников, А.С. Боярченко, А.Я. Купряжкин. – Екатеринбург : Урал. ун-т, 2016. – 60 с.
5. Дигрис, А.В. Дискретно-событийное моделирование [Электронный ресурс] : курс лекций / А.В. Дигрис. – Минск : БГУ, 2011. – Режим доступа: <http://elib.bsu.by>, ограниченный.
6. Шевченко, А.А. Управление временем при проектировании имитационных моделей / А.А. Шевченко // Прикладная информатика. – 2006. – № 3. – С. 113–119.
7. Колеснева (Акулич), И.П. Поддержка принятия решений при организации противодействия средствам радиолокационной разведки космического базирования : дис. ... канд. техн. наук : 20.02.12 / И.П. Колеснева (Акулич). – Минск, 2017. – 183 л.

REFERENCES

1. Jel'berg, M.S. Imitacionnoe modelirovanie : ucheb. posobie / M.S. Jel'berg, N.S. Cygankov. – Krasnojarsk : Sib. feder. un-t, 2017. – 128 s.
2. Akopov, A.S. Imitacionnoe modelirovanie : uchebnik i praktikum dlja akademicheskogo bakalavriata / A.S. Akopov – M.: Jurajt, 2017. – 389 s.
3. Harin, Ju.S. Matematicheskie i komp'juternye osnovy statisticheskogo modelirovanija i analiza dannyh : ucheb. posobie / Ju.S. Harin, V.I. Maljugin i dr. – Minsk : Belarus. gos. un-t, 2008. – 455 s.
4. Nekrasov K.A. Metod Monte-Karlo na graficheskix processorah : uchebnoe posobie / K.A. Nekrasov, S.I. Potashnikov, A.S. Bojarchenkov, A.Ja. Kuprjashkin. – Ekaterinburg : Ural. un-t, 2016. – 60 s.
5. Digris, A.V. Diskretno-sobyitnoe modelirovanie [Jelektronnyj resurs] : kurs lekcij / A.V. Digris. – Minsk : BGU, 2011. – Rezhim dostupa: <http://elib.bsu.by>, ogranichenyj.
6. Shevchenko, A.A. Upravlenie vremenem pri proektirovanii imitacionnyh modelej / A. A. Shevchenko // Prikladnaja informatika. – 2006. – № 3. – S. 113–119.
7. Kolesneva (Akulich), I.P. Podderzhka prinjatija reshenij pri organizacii protivodejstvija sredstvam radiolokacionnoj razvedki kosmicheskogo bazirovanija : dis. ... kand. tehn. nauk : 20.02.12 / I.P. Kolesneva (Akulich). – Minsk, 2017. – 183 l.

THE BASIC STAGES OF IMITATING MODELLING AND THEIR REALIZATION IN THE DECISION-MAKING SUPPORT SYSTEM

*Military Academy of the Republic of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

The stages of imitating modeling are described in the article. The stages detail the following: construction of logical-mathematical model of investigated system, working out of the modeling algorithm that describes process of its functioning, working out of the program that realizes the algorithm, carrying out of experiments with imitating model. The authors suggest the description of the realization of the imitating modeling principles of in the decision-making support system of the organization of the remote sounding of the Earth. The features of the realization of the models of the casual choice of the modes of the remote sounding of the Earth, space vehicle, land objects are considered in the article.

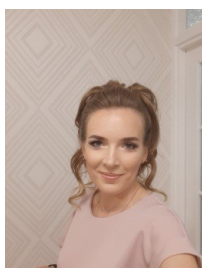
Keywords: modeling; imitating model; modeling algorithm; imitation of casual event; decision-making support system; remote sounding of the Earth



Акулич Сергей Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, область научных интересов – системный анализ, теория вероятностей, прикладная математика, теория принятия решений, математическое моделирование.

Akulich S.V., PhD, associate professor, professor of the Department of Information and computing systems, Military Academy of the Republic of Belarus.

E-mail: serge_asv@mail.ru



Колеснева Инна Петровна, кандидат технических наук, доцент, область научных интересов – системный анализ, методы математического программирования, обоснование и оптимизация управленческих решений, разработка систем поддержки принятия решений.

Kolesneva I.P., PhD, associate professor, deputy head of the Department of Information and computing systems, Military Academy of the Republic of Belarus.

E-mail: inn2119@rambler.ru



Жук Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент, область научных интересов – системный анализ, методы математического программирования, методы и алгоритмы нейросетевой технологии обработки информации.

Zhuk A.A., PhD, associate professor, head of the Department of Information and computing systems, Military Academy of the Republic of Belarus.

E-mail: k210@tut.by

ВИШНЯКОВ В.А., СЯ И.В.

СИСТЕМА ИОТ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ БОЛЕЗНИ ПАРКИНСОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И OSTIS

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

Цель данной работы состоит в том, чтобы разработать систему ИТ-диагностики болезни Паркинсона (БП) с удаленным доступом на базе сети Интернета вещей (IoT). Авторы ранее разработали метод комплексного распознавания болезни Паркинсона с использованием машинного обучения, маркерах анализа голоса и изменениях в движениях пациента. Два общедоступных набора данных (sound, action) были выбраны в качестве экспериментальных. В статье приведена его реализация на базе сети IoT. Разработка сети выполнена с использованием OSTIS (Open Semantic Technology for Intelligent Systems).

В сети IoT смартфон является точкой ввода и предварительной обработки двух наборов данных, включая извлечение признаков из аудиозаписи голоса пациента и его двигательной активности. Передача данных осуществляется через локальный сервер Flask, действующий как канал для пересылки функциональных данных на сервер OSTIS. Сервер OSTIS обрабатывает данные, полученные с локального сервера Flask, и использует агента прогнозирования нейронной сети для распознавания БП. Этот агент загружает признаки, извлеченные из голоса и движения пациента, и делает прогнозы на основе обученной нейронной сети, связывая эти прогнозы со знаниями в системе OSTIS, и сохраняет их в базе данных.

Результатом исследования является архитектура и алгоритмы работы сети IoT. Рабочий процесс всей системы включает в сбор и предварительную обработку данных устройствами Интернета вещей (смартфоном, датчиками движения) последующую передачу данных на локальный сервер Flask, дальнейшую пересылку на сервер OSTIS, обработку модели нейронной сети агентом нейросетевого предсказателя и, в конечном счете, связывание обработанных результатов с графом знаний и сохранение их в системе.

Система удаленной ИТ-диагностики БП обеспечивает обработку данных пациентов в режиме реального времени, распознавание признаков заболевания в сети Интернета вещей, поддержки расширенного анализа и принятия решений по дальнейшему лечению.

Ключевые слова: сеть Интернет вещей, диагностика болезни Паркинсона, нейронные сети, база знаний, ОСТИС, алгоритмы, архитектура

Введение

Ранняя диагностика болезни Паркинсона (БП) является сложной задачей для медицинского сообщества [1]. В настоящее время диагноз заболевания основан на анамнезе, клинических признаках и симптомах, но поскольку заболевание начинается медленно и клинические симптомы появляются не сразу, пациенты часто находятся на продвинутой стадии заболевания. Когда поставлен диагноз, упущено лучшее время для лечения. Разработка новых методов лечения в этой области зависит от двух основных аспектов: ранняя диагностика заболевания; правильная и постоянная оценка эффективности лечения.

Из-за таких симптомов, как тремор и снижение амплитуды движений, почерк пациентов с БП мельче и более искажен, чем у нормальных людей. Перейра К.Р. и соавторы [2] предложили метод раннего выявления болезни Паркинсона, при котором исследовали почерк пациентов с помощью смарт-ручки и просили нарисовать соответствующие

графики. Фукава К. и соавторы [3], Япония, также определили болезнь Паркинсона по движениям рук пациента, за исключением того, что в исследовании использовалась искусственная нейронная сеть для оценки количества постукиваний пальцами пациентов с болезнью Паркинсона. Их измерительная система состояла из пары 3-осевых акселерометров, пары сенсорных датчиков, аналого-цифрового преобразователя и персонального компьютера.

В работе авторов [4] при обучении нейронной сети для распознавания БП была использована частотно-временная функция, (вейвлета) и Мел-кепстральные коэффициенты (MFCC). Применен алгоритм KNN (k Nearest Neighbor) и алгоритм двухслойной нейронной сети для обучения и тестирования на два общедоступных наборах данных о изменении речи (sound) и движения (action) пациентов с болезнью Паркинсона. Для улучшения гиперпараметров KNN алгоритма использован байесовский оптимизатор. Построенные модели достигли точности 94,7 % и 96,2 % на речевых данных пациентов с болезнью

Паркинсона и наборе данных об их передвижении соответственно.

Следующей задачей является создание системы ИТ-диагностики БП с использованием Интернета вещей, способной дистанционно даже без врачей проводить исследования пациентов. Для проектирования такой системы предлагается использовать технологию OSTIS.

Открытая семантическая технология для интеллектуальных систем ()

OSTIS – это передовая технология с открытым исходным кодом, предназначенная для облегчения разработки совместимых интеллектуальных систем следующего поколения [5]. Суть OSTIS заключается в создании интеллектуальных систем, которые органично интегрируют различные типы знаний и модели решения проблем, признавая, что набор требуемых моделей и знаний различается для разных классов задач. Хотя некоторые гибридные интеллектуальные системы пытались решить эту проблему, они часто страдали от монолитных структур, которые препятствовали гибкости и возможности их повторного использования, что приводило к большим затратам на разработку.

OSTIS преодолевает эти ограничения, использует универсальное представление инфор-

мации, известное как SC-код. Это представление, основанное на дискретной математике, обладает рядом преимуществ:

1. Единообразное представление: любая информация может быть закодирована последовательно.

2. Удобный для машин и читаемый человеком SC-код, который обеспечивает как простоту машинной обработки, так и понимание человеком.

3. Нелинейный и абстрактный вид, который может кодировать информацию в семантических ассоциативных компьютерах.

4. Элементы языка (SC-code) используют базовый алфавит всего из пяти элементов для построения сложных структур.

5. Универсальность: SC-код может представлять не только системные знания, но и модели решения проблем и системные интерфейсы.

Описание архитектуры сети IoT

Рассмотрим архитектуру сети IoT, реализующую метод комплексного распознавания болезни Паркинсона (рисунок 1), включающая обученные нейронные сети, разработанную с использованием технологии OSTIS. Рассмотрим ее основные компоненты.

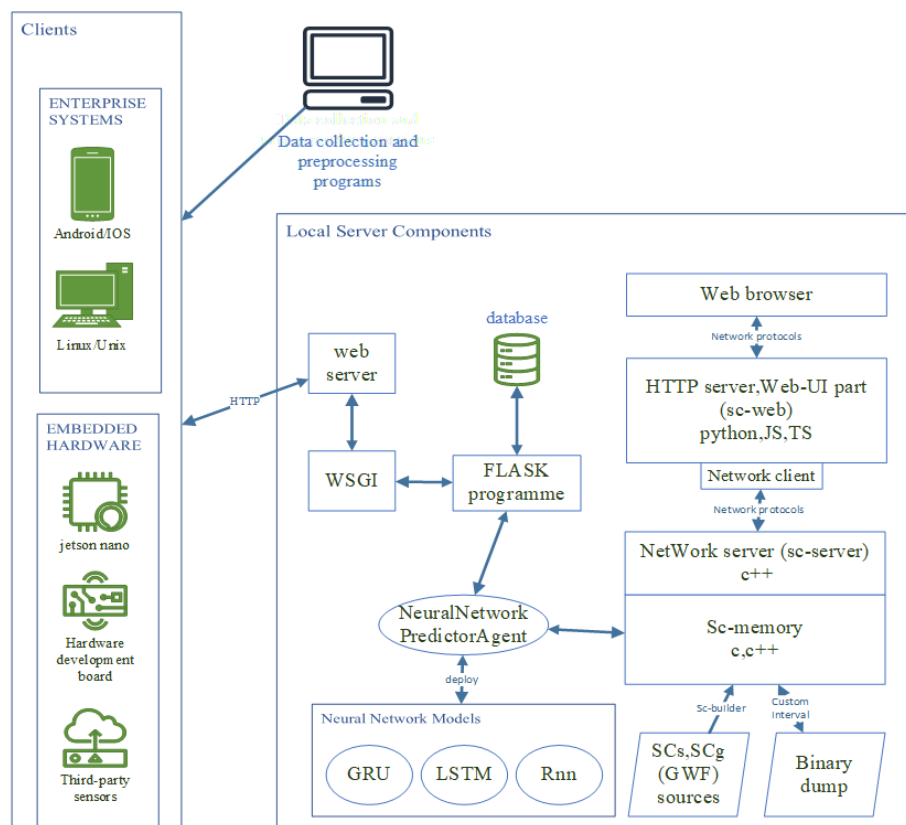


Рисунок 1. Архитектура системы Интернета вещей для ИТ-диагностики БП

1. Clients. Корпоративные системы (Android/iOS и Linux/Unix). Это клиентские системы, используемые пациентами, для взаимодействия с приложением на базе OSTIS. Они служат пользовательским интерфейсом, через который можно вводить данные, делать запросы или получать информацию.

Emdeded hardware (Jetson Nano, Hardware Development Board, датчики сторонних производителей): это оборудование предназначено для сбора различных данных, связанных со здоровьем пациентов. Данные, собранные этими устройствами, затем преобразуются в формат SC-кода (семантик код) и интегрируются в базу знаний системы OSTIS, где их можно обрабатывать и анализировать, чтобы получить представление о состоянии здоровья пациента.

2. Local Server component. Веб-сервер: служит точкой входа для HTTP-запросов от клиентов, выступая в качестве посредника между клиентом и веб-ориентированным семантическим интерфейсом системы OSTIS. WSGI: соединяет веб-сервер с Flask, обеспечивая связь между веб-сервером и семантическим интерфейсом системы OSTIS, реализованным через Flask. Программа Flask [6]: действует как часть интерфейса OSTIS, который описывается с помощью SC-кода. Он предоставляет веб-ориентированный семантический интерфейс для пользователей, преобразуя SC-код в формат, понятный человеку, и наоборот.

База данных: может быть любого типа, например SQL или NoSQL, используется для постоянного хранения и извлечения данных в соответствии с требованиями приложения.

3. Neural Network Predictor Agent. Это ядро прогностических возможностей системы, включает различные типы нейронных сетей, такие как Gated Recurrent Unit (GRU), долговременная кратковременная память (LSTM) и рекуррентные нейронные сети (RNN).

4. OSTIS Web Platform Components [7]. Веб-браузер: предоставляет пользователям доступ к семантическому интерфейсу системы OSTIS, позволяя им взаимодействовать с базой знаний и решателями проблем. Сетевой клиент и сервер (HTTP-сервер, sc-web, sc-server): компоненты работают вместе для поддержки семантического веб-интерфейса системы OSTIS, отвечают за обработку и доставку семантических данных в веб-браузер и из него.

Sc-память: хранилище семантической сети в рамках OSTIS framework. База знаний хранится, к ней получают доступ разработчики задач и семантический веб-интерфейс. SCs, SCg: различные формы визуализации SC-кода, используемые для представления моделей знаний и решения проблем в системе OSTIS.

Binary dump: относится к двоичному представлению компонентов знаний или состоянию SC-памяти, которое может использоваться для различных целей, таких как миграция, резервное копирование или репликация базы знаний системы OSTIS.

Алгоритм работы системы ИТ-диагностики БП включает:

1. Сбор данных. Наблюдение за пациентами осуществляется с помощью различных встроенных аппаратных устройств, которые собирают данные о состоянии здоровья в режиме реального времени. Эти устройства могут включать датчики для мониторинга жизненно важных показателей, движения и других показателей здоровья.

2. Предварительная обработка данных. Необработанные данные, собранные датчиками, подвергаются предварительной обработке, которая может включать нормализацию, извлечение признаков и селекцию. Цель состоит в том, чтобы подготовить данные для анализа путем удаления шума и выделения соответствующих закономерностей. Этот шаг выполняется перед отправкой данных на платформу OSTIS.

3. Хранение данных. Характеристики, извлеченные из необработанных показаний датчиков, сохраняются в базе данных. Сохраненные данные структурированы в соответствии с требованиями нейронных сетей, входные данные представлены в правильном формате для последующего этапа диагностического анализа в рамках платформы OSTIS.

4. Интеграция данных. Посланные на платформу OSTIS характеристики данных пациентов, интегрируются в систему.

5. Работа нейронной сети. Для ИТ-диагностики используются сети GRU, LSTM, RNN, которые предварительно обучены на наборах данных. Затем они обрабатывают данные новых пациентов для составления прогнозов.

6. Диагностический вывод. Выходные данные агента нейронной сети предоставляют диагностическую оценку или прогноз состояния здоровья, показывая вероятность заболевания по изменению голоса или движения пациентов.

7. Взаимодействие с пользовательским интерфейсом. Результаты диагностики становятся доступными врачам и пациентам через пользовательский интерфейс системы OSTIS. Веб-интерфейс, разработанный совместно с Flask, позволяет пользователям взаимодействовать с системой через веб-браузер на клиентских устройствах.

8. Обзор и действия. Медицинские работники просматривают выходные данные системы OSTIS, принимая во внимание общую историю болезни пациента и контекст. Они могут использовать эту

информацию для принятия решений о методах лечения или планировании дополнительных анализов.

Устройство ввода и сбор данных

Смартфон собирает два типа данных пациентов: аудиоданные голоса (их звуковые характеристики) и движения пациента (записываются характеристики движений пациента). Алгоритм получения данных об движении пациента включает шаги.

1. Использование библиотеки Python (PySensors) работы с датчиком ускорения смартфона. Настройка параметров датчика, установив частоту дискретизации на 64 Гц и точность датчика на 16 бит.

2. Создание структуры данных о движении пациента для их сохранения. В цикле выполняется считывание данных датчика движения.

3. Сохранение данных в локальном файле для дальнейшей обработки и анализа.

Алгоритм сбора голосовых данных пациента со смартфона включает.

1. Использование библиотеки Python (PyAudio) для работы с микрофоном смартфона.

2. Инициализация микрофона и установка параметров звука. Частота дискретизации составляет 44100 Гц, количество каналов равно 1, а разрядность равна 16.

3. Создание аудиопотока для приема и записи голосовых данных.

4. Запись голосовых данных и сохранение их в локальном файле.

Следующим шагом после сбора и записи данных акселерометра и голоса пациентов является предварительная обработка и извлечение характеристик из этих данных.

Алгоритм предварительной обработки данных и извлечения признаков включает.

1. Очистка и калибровка данных: собранные данные подвергаются первоначальной очистке и калибровке для удаления потенциальных шумов и выбросов. Для данных акселерометра выполняется калибровка датчика для обеспечения согласованности данных в рамках общей системы отсчета [4].

2. Анализ во временной и частотной областях, проводится для получения основных характеристик сигнала. Он включает форму сигнала, энергию, длительность и многое другое. Анализ в частотной области охватывает спектральное распределение, частотные компоненты и связанные с ними характеристики [4].

3. Извлечение признаков: из данных акселерометра и голосовых данных извлекаются признаки, представляющие информативные и значимые атрибуты, которые помогают в распознавании БП. Для данных акселерометра извлекаются статистические характеристики моделей

движения, такие как среднее значение, стандартное отклонение, энергия и т. д. Для голосовых данных извлекаются характеристики звука, как основная частота, высота тона, спектральные характеристики и т. д.

4. Нормализация: извлеченные характеристики нормализуются, чтобы гарантировать, что они имеют схожие масштабы, предотвращая непропорциональное влияние определенных функций на обучение модели.

5. Выбор: при большом количестве извлеченных характеристик выбираются наиболее релевантные и полезные из них, уменьшая размерность и повышая эффективность и быстродействие модели.

6. Хранение данных: данные сохраняются в виде файла значений, разделенных запятыми, для локального хранения.

Алгоритм передачи данных с мобильного смартфона на сервер Flask:

1. Смартфон собирает данные акселерометра или голосовые данные пациентов и выполняет предварительную обработку и извлечение объектов.

2. Данные объектов упаковываются в формате JSON. Ниже приведен пример JSON:

```
``json
{
  "data_type": "ускорение", // или "голос",
  указывающий тип данных
  "функции": [
    {
      "имя_функции": "имя_функции_1",
      "значение": 0.123
    },
    {
      "имя_функции": "имя_функции_2",
      "значение": 0.456
    },
    // Дополнительные возможности...
  ]
}
```

3. Персылка данных JSON на сервер Flask, используя протокол HTTP, с запросом POST.

Целевой URL: <http://192.168.100.14:5000/getdata>. Заголовок запроса содержит информацию о типе данных и может быть задан как "Content-Type: application/json".

4. Сервер Flask получает и обрабатывает запрос по маршруту "getdata".

5. При получении данных на стороне сервера Flask может быть применен ряд различных стратегий обработки, зависящих от типа данных. Эти стратегии включают хранение данных в локальных файлах, проведение более углубленных аналитических процедур или использование прогностических моделей для принятия решений о заболевании.

В вышеописанном алгоритме данные передаются с мобильного устройства на сервер Flask, который получает данные по указанному маршруту и выполняет необходимую обработку.

Настройка локального сервера с помощью системы OSTIS

Веб-платформа OSTIS [8] – это веб-ориентированная программная платформа проекта OSTIS. Она служит основой для развертывания существующих систем OSTIS и создания новых и включает в себя следующие компоненты:

- 1. База знаний [9], содержит онтологии верхнего уровня, помогающие в разработке различных информационных моделей.
- 2. Машина обработки знаний [10], обеспечивает хранение семантической сети и обработку знаний на основе агентов.
- 3. Веб-ориентированный семантический интерфейс [11], позволяет пользователям взаимодействовать с интеллектуальной системой.

Алгоритм для быстрого запуска Docker Compose, подходящий для Linux и macOS:

- 1. Копия репозитория и переход в каталог:
git clone https://github.com/ostis-ai/ostis-web-platform --рекурсивный
cd ostis-веб-платформа
- 2. Загрузка образа из Docker Hub:
docker compose pull
- 3. Создание базы знаний:
docker compose запустите машинную сборку
- 4. Запуск веб-платформы:
docker compose up

С помощью Docker Compose:

- 1. Создание базы знаний (перед первым запуском или после обновления исходных файлов БЗ):
docker compose запустите машинную сборку
- 2. Запуск службы платформы и получение доступа к веб-интерфейсу (адрес: localhost:8000):
docker compose up
- 3. Запуск машины обработки знаний:
./scripts/run_sc_server.sh
- 4. В другом терминале запуск семантического веб-интерфейса (адрес: localhost:8000):
./scripts/run_sc_web.sh

На рисунке 2 показаны элементы работы системы в виде активных контейнеров в среде Docker. Когда сервер Flask получает данные, он пересылает их агенту нейронной сети на сервере OSTIS. Роль этого агента заключается в загрузке соответствующей модели нейронной сети и обработке полученных данных. Нейронная сеть делает прогнозы и генерирует результаты, сохраняет их в базе данных. Затем сервер Flask создает ответ, инкапсулирующий результаты прогнозирования в формате JSON, и отправляет его клиенту, чтобы пользователи могли получить доступ к результатам анализа в режиме реального времени. Процесс обеспечивает целостность и постоянство данных, позволяя пользователям взаимодействовать с сервером OSTIS через сервер Flask для доступа к нужной информации. Рассмотрим назначение составляющих на рисунке 2.

☐	Name	Image	Status	CPU (%)	Port(s)	Last started	Actions
☐	ostis-web-platform		Running (2/2)	9.03%		15 hours ago	
☐	web-1 e7b19874f865	ostis/sc-web:0.7.0-Rebirth	Running	0.05%	8000:8000	15 hours ago	
☐	machine-1 089cda169167	ostis/sc-machine:0.7.0-Rebirth	Running	8.98%	8090:8090	15 hours ago	

Рисунок 2. Запущенные контейнеры в docker

Ostis-web-platform: контейнер служит структурой для веб-платформы OSTIS, инкапсулируя экземпляры web-1 и machine-1. Он организует общий рабочий процесс и взаимодействие между веб-интерфейсом и механизмом обработки знаний. Web-1: работая под управлением ostis/sc-web:0.7.0-Rebirth, этому экземпляру контейнера поручено предоставлять компонент платформы «Веб-ориентированный семантический интерфейс». Отображение порта 8000 указывает на его роль в обработке веб-трафика. Mashine-1: этот контейнер, использующий ostis/sc-machine:0.7.0-Rebirth, предназначен для платформы «машина обработки

знаний». Он управляет хранилищем семантической сети и выполняет обработку знаний на основе агентов. Загрузка процессора указывает на активное участие в задачах обработки данных, а отображение порта 8090 указывает на его роль во внутренних коммуникациях или предложениях специализированных услуг.

Вместе контейнеры web-1 и machine-1 представляют собой операционные элементы веб-платформы OSTIS, которые взаимодействуют, создавая комплексную систему управления знаниями и их обработки с помощью удобного для пользователя веб-интерфейса.

Отображение данных в системе OSTIS

Алгоритм отображения данных в системе OSTIS включает в себя следующие этапы:

1. Интеграция базы знаний: включает в себя создание или обновление структур знаний в системе для представления вновь полученных данных.

2. Семантическое представление: данные должны быть представлены с использованием семантического кода OSTIS (SC-code) [12] для обеспечения совместимости с возможностями системы обработки знаний. Это может включать определение новых семантических отношений или сущностей для представления данных.

3. Пользовательский интерфейс: OSTIS предоставляет веб-ориентированный семантический интерфейс. Этот интерфейс можно настроить для отображения результатов прогнозирования в удобной для пользователя и информативной форме. Пользователи могут запрашивать у системы доступ к конкретным данным и визуализировать их через интерфейс. На рисунке 3 показан пример описание знаний (на SC-коде) распознавания БП по изменению движения пациента (SCn-узлы), представленные в базе знаний веб-интерфейса OSTIS.

4. Визуализация и анализ: в зависимости от характера результатов прогнозирования система OSTIS может предлагать различные инструменты визуализации и возможности анализа. Пользователи могут просматривать данные, создавать отчеты или выполнять дальнейший анализ в рамках системы.

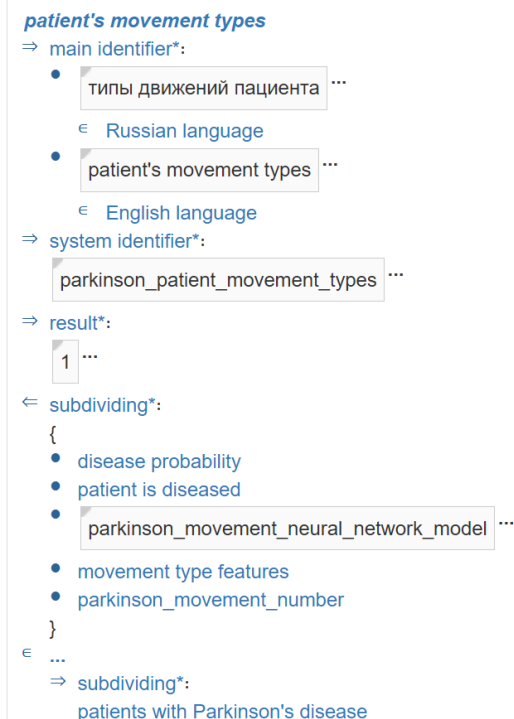


Рисунок 3. SCn-узлы, представленные в базе знаний веб-интерфейса OSTIS

Результаты распознавания.

Данные тестовых экспериментов для БП по изменению речи были собраны у 188 пациентов с БП (107 мужчин и 81 женщина) в возрасте от 33 до 87 лет ($65,1 \pm 10,9$) на отделении неврологии медицинского факультета Сетраха Стамбульского университета. Контрольную группу составили 64 здоровых человека (23 мужчины и 41 женщина) в возрасте от 41 до 82 лет ($61,1 \pm 8,9$). Получено 94,7 % точности при диагностировании болезни Паркинсона на основе речевых данных и показателя F1 оценки 92,95 %. Точность набора обучающих данных составила 92,8 %, а точность набора тестовых данных – 94,7 %. На том же наборе данных [13] один из лучших показателей зарубежных исследований составляет 95,8 % [14].

Данные тестовых экспериментов при распознавании БП по изменению движений (freezing of gait – FoG) взяты от 32 мужчин и 18 женщин, средний возраст которых составил $70,9 \pm 9,8$ лет, продолжительность заболевания – $7,2 \pm 5,4$ года. Эксперименты показали, что точность распознавания при использовании двухслойной нейронной сети для набора данных по изменению движения пациентов достигает 96,2 %. На том же наборе данных Daphnet один из лучших показателей зарубежных исследователей составляет 98,8 % [15].

Заключение

1. Представлена архитектура сети IoT и алгоритмы работы системы ИТ-диагностики БП на основе аудиозаписей голоса пациента и его двигательной активности. Устройство Интернета вещей служит для сбора и предварительной обработки данных пациентов, используя смартфоны для извлечения характеристик, которые передаются через локальный сервер Flask. Ядро системы, сервер OSTIS, служит платформой базы знаний, на нем размещен агент прогнозирования нейронной сети, который загружает, выполняет и связывает прогнозы с существующими знаниями. Результаты апробации предложенной системы показали точности распознавания БП 94,7 % и 96,2 % на наборах данных об изменении речи и замедления движения пациентов соответственно.

2. Уникальность этой системы заключается в ее способности обеспечивать удаленную обработку данных в режиме реального времени и распознавание сложных объектов на примере БП в сети Интернета вещей. Объединение данных и базы знаний позволяет проводить углубленный анализ и принимать обоснованные решения в области диагностики болезни Паркинсона.

3. При диагностике болезни Паркинсона по изменению голоса пациентов была достигнута точность теста 94,7 %. При диагностике болезни Паркинсона по изменению движений пациентов (FoG) была достигнута точность теста 96,2 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. **William, D.** Parkinson's disease: mechanisms and models / D. William, S. Przedborski. – Neuron. 2003. – V. 39. – Pp. 889–909.
2. **Clayton, R.P.** Deep learning-aided Parkinson's disease diagnosis from handwritten dynamics / Clayton R.P., Weber S.A., Hook C., Rosa G.H., Papa J.P. // Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing (SIBGRAPI). 2016. Dauer. – Pp. 340–346.
3. **Fukawa, K.** Estimation of UPDRS finger tapping score by using Artificial Neural Network for quantitative diagnosis of Parkinson's disease / Fukawa K., Okuno R., Yokoe M., Sakoda S., Akazawa K // IEEE EMBS International Conference on Information Technology Applications in Biomedicine (ITAB). 2007. – Pp. 259–260.
4. **Вишняков В.А.** Распознавание признаков болезни Паркинсона на основе анализа голосовых маркеров и двигательной активности // В.А. Вишняков, Ся Ивэй. Информатика. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 106–114.
5. **Голенков, В.В.** Открытая технология онтологического проектирования, производства и эксплуатации семантически совместимых гибридных интеллектуальных компьютерных систем / В.В. Голенков, Н.А. Гулякина, Д.В. Шункевич. – Минск : Бестпринт, 2021. – 690 с.
6. **Vyshnavi V.R.** Efficient Way of Web Development Using Python and Flask / V.R. Vyshnavi, Amit Malik // Int. J. Recent Res. Asp. 2019. V. 6. – Pp. 16–19.
7. **Zotov, N.** Implementation of Information Retrieval Subsystem in the Software Platform of ostis-systems = Реализация информационно-поисковой подсистемы в программной платформе ostis-систем / N. Zotov: сборник научных трудов / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В.В. Голенков [и др.]. – Минск, 2023. – Вып. 7. – С. 77–94.
8. **Sadouski, M.** User Interface of the OSTIS Ecosystem = Пользовательский интерфейс экосистемы OSTIS / M. Sadouski // сборник научных трудов / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. В. Голенков [и др.]. – Минск, 2023. – Вып. 7. – С. 153–158.
9. **Davydenko, I.T.** Ontology-Based Knowledge Base Design / I.T. Davydenko // материалы международной научно-технической конференции (Минск, 16-18 февраля 2017 года) / редкол. : В.В. Голенков (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУИР, 2017. – С. 57–72.
10. **Shunkevich, D.V.** Ontology-based Design of Knowledge Processing Machines / D.V. Shunkevich // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2017) : материалы международной научно-технической конференции (Минск, 16 - 18 февраля 2017 года) / редкол. : В.В. Голенков (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУИР, 2017. – С. 73 – 94.
11. **Sadouski, M.E.** Ontological approach to the building of semantic models of user interfaces / M. E. Sadouski // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В.В. Голенков [и др.]. – Минск, 2021. – Вып. 5. – С. 105–116.
12. **Bantsevich K.** Metasystem of the OSTIS Technology and the Standard of the OSTIS Technology = Метасистема Технологии OSTIS и Стандарт Технологии OSTIS / K. Bantsevich // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS-2022) : сборник научных трудов / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В.В. Голенков [и др.]. – Минск, 2022. – Вып. 6. – С. 357–368.
13. **Sakar C.O., Serbes G., Gunduz A., Tunc H.C., Nizam H., ..., Apaydin H.** A comparative analysis of speech signal processing algorithms for Parkinson's disease classification and the use of the tunable Q-factor wavelet transform. Applied Soft Computing, Jan. 2019, vol. 74, pp. 255–263.
14. **Sakar B.E., Isenkul M.E., Sakar C.O., A. Sertbas, Gorgen F., ..., Kursun O.** Collection and analysis of a Parkinson speech dataset with multiple types of sound recordings. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2013, vol. 17(4), pp. 828–834.
15. **Li B., Yao Z., Wang J., Wang S., Yang X., Sun Y.** Improved Deep Learning Technique to Detect Freezing of Gait in Parkinson's Disease Based on Wearable Sensors. Electronics, 2020, no. 9(11), pp. 1–12.

REFERENCES

1. **William D., Przedborski S.** Parkinson's disease: mechanisms and models. Neuron. 2003. V. 39. P. 889-909.
2. **Clayton R.P., Weber S.A., Hook C., Rosa G.H., Papa J.P.** Deep learning-aided Parkinson's disease diagnosis from handwritten dynamics. Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing (SIBGRAPI). 2016. Dauer. P. 340-346.
3. **Fukawa K., Okuno R., Yokoe M., Sakoda S., Akazawa K.** Estimation of UPDRS finger tapping score by using Artificial Neural Network for quantitative diagnosis of Parkinson's disease. IEEE EMBS International Conference on Information Technology Applications in Biomedicine (ITAB). 2007. P. 259-260.
4. **Vishnyakou U.A., Xia Yiwei.** Recognition of signs of Parkinson's disease based on the analysis of voice markers and motor activity. Informatics. 2023. Vol. 20, No. 3. Pp. 106-114.
5. **Golenkov V.V., Gulyakina N.A., Shunkevich D.V.** Open technology of ontological design, production and operation of semantically compatible hybrid intelligent computer systems. Minsk : Bestprint, 2021. 690 p.

6. Vyshnavi V.R., Malik Amit. Efficient Way of Web Development Using Python and Flask. Int. J. Recent Res. Asp. 2019. V. 6. P. 16-19.
7. Zotov, N. Implementation of Information Retrieval Subsystem in the Software Platform of ostis-systems. Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS) : collection of scientific papers / Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics ; editorial board: V. V. Golenkov [et al.]. Minsk, 2023. Issue 7. P. 77-94.
8. Sadouski M. User Interface of the OSTIS Ecosystem. Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS) : collection of scientific papers / Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics ; editorial board: V.V. Golenkov [et al.]. Minsk, 2023. Issue 7. P. 153-158.
9. Davydenko, I.T. Ontology-Based Knowledge Base Design. Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2017) : materials of the International scientific and technical conference (Minsk, February 16-18, 2017) / editorial board: V. V. Golenkov (ed.) [and others]. Minsk : BGUIR, 2017. P. 57-72.
10. Shunkevich, D.V. Ontology-based Design of Knowledge Processing Machines. Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2017) : materials of the International scientific and technical conference (Minsk, February 16-18, 2017) / editorial board : V.V. Golenkov (ed.) [and others]. Minsk : BGUIR, 2017. P. 73-94.
11. Sadouski, M.E. Ontological approach to the building of semantic models of user interfaces. Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2021) : collection of scientific papers / Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics ; editorial board: V. V. Golenkov [et al.]. Minsk, 2022. Issue 5. P. 105-116.
12. Bantsevich, K. Metasystem of the OSTIS Technology and the Standard of the OSTIS Technology. Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2022) : collection of scientific papers / Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics ; editorial board: V. V. Golenkov [et al.]. Minsk, 2022. Issue 6. P. 357-368.
13. Daphnet Freezing of Gait Data Set [Electronic resource]. – Access mode : <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Daphnet%2BFreezing%2Bof%2BGait>. – Access date : 12.3.2023.
14. Fawcett T. An introduction to ROC analysis. Pattern Recognition Letters, 2006, vol. 27, no. 8, pp. 861-874.
15. Li B., Yao Z., Wang J., Wang S., Yang X., Sun Y. Improved Deep Learning Technique to Detect Freezing of Gait in Parkinson's Disease Based on Wearable Sensors. Electronics, 2020, no. 9(11), pp. 1-12.

VISHNIAKOU U.A., XIA I.W.

IOT SYSTEM ARCHITECTURE FOR THE DIAGNOSIS OF PARKINSON'S DISEASE USING NEURAL NETWORKS AND OSTIS

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

The purpose of this work is to develop an IT diagnostic system for Parkinson's disease (PD) with remote access based on the Internet of Things (IoT) network.

Methods. The authors have developed a method for complex recognition of Parkinson's disease using machine learning, based on markers of voice analysis and changes in patient movements on known datasets. In the architecture of the Internet of Things network, a smartphone is the point of initial data collection and preprocessing, including extracting features from an audio recording of the patient's voice and his motor activity. Data is transmitted via a local Flask server, which acts as a channel for sending functional data to the Open Semantic Technology for Intelligent Systems (OSTIS) server. The OSTIS server processes the data received from the local Flask server and uses a neural network prediction agent to recognize BP. This agent downloads features and makes predictions based on a trained neural network, linking these predictions with knowledge in the OSTIS system, and stores them in a database.

The result of the study is the architecture and algorithms of the IoT network. The workflow of the entire system includes data collection and preprocessing by the Internet of Things device, subsequent data transfer to the local Flask server, further forwarding to the OSTIS server, processing of the neural network model by a neural network predictor agent and, ultimately, linking the processed results to the knowledge graph and storing them in the system.

The BP remote IT diagnostics system provides real-time processing of patient data, recognition of disease signs on the Internet of Things, support for advanced analysis and decision-making for further treatment.

Keywords: Internet of Things network, diagnosis of Parkinson's disease, neural networks, knowledge base, OSTIS, algorithms, architecture



Вишняков Владимир Анатольевич, д.т.н., профессор, профессор БГУИР, кафедра ИКТ. Область научных интересов: информационное управление и безопасность, электронный бизнес, интеллектуальные системы управления, сети интернет вещей, блокчейн. Член 2-х докторских Советов по защите диссертаций. Автор более 520 научных работ, в том числе 8 монографий (2 на английском языке), 4-х учебных пособий с грифом Министерства образования, 8-и томов учебного комплекса «Информационный менеджмент», 195 научных статей.

Vishniakov Uladzimir Anatolyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of BSUIR, Department of ICT. Research interests: information management and security, electronic business, intelligent control systems, IoT network. Member of 2 doctoral Councils for the defense of dissertations. Author of more than 520 scientific papers, including 8 monographs (2 in English), 4 textbooks with the stamp of the Ministry of Education, 8-volume educational complex "Information Management", 195 scientific articles.

E-mail: vish2002@list.ru

Ся Ивей, магистр технических наук, аспирант кафедры ИКТ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Научные интересы: идентификация объектов и интеллектуальные системы управления.

Xia Iwey, master of technical science, PhD-student of ICT department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Research interests: identification of objects and intelligent control systems.