

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 26

2020

№ 7

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

САПР

КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА

МЕТОДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

ОПЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДЫ

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

НЕЙРОСЕТИ И
НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ОПТИМИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

ИТ В ОБРАЗОВАНИИ

ГИС

«СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ»

Таблица 2

Ошибка между истинными и найденными значениями для различных вероятностей скрещивания и заданной программе отделения

Время, с	Порог вероятности скрещивания P									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0	239,80	154,94	251,44	2,76	180,92	120,84	181,52	394,64	194,07	174,62
1	161,20	315,20	470,49	7,50	390,59	335,57	147,31	492,09	41,53	112,92
2	209,31	197,79	390,55	11,61	340,60	223,94	135,58	341,64	1,31	37,96
3	78,74	230,99	299,59	18,46	32,19	168,26	4,54	279,57	1,71	16,59
4	36,60	94,46	212,00	17,88	116,27	14,01	1,55	207,32	1,39	0,00
5	66,88	58,89	106,80	65,61	55,97	20,07	0,93	47,84	1,40	0,04
6	102,91	84,78	97,48	42,76	57,27	6,44	17,09	7,17	1,38	0,02
7	32,60	6,98	39,12	137,37	4,79	21,28	29,45	14,67	1,08	0,03
8	18,63	180,67	160,29	47,49	49,08	210,89	90,73	13,74	1,54	0,15
9	132,91	29,64	271,29	7,47	56,13	50,55	5,79	24,29	23,54	0,46
10	303,12	32,53	81,58	32,36	40,67	577,11	4,75	17,52	1,89	0,02
11	344,87	70,77	193,05	30,58	51,58	195,79	10,68	87,03	3,97	0,04
12	69,92	16,01	45,22	79,27	140,57	110,18	60,70	112,38	3,29	0,12
13	60,78	220,87	0,34	390,01	40,58	8,02	70,85	432,45	43,62	0,01
14	233,47	36,86	55,66	469,52	28,53	69,21	93,25	121,50	17,24	0,24
15	12,13	136,96	114,48	165,05	34,08	2,18	54,04	124,21	34,66	2,13
16	118,17	23,06	47,85	125,85	28,27	78,52	65,92	181,07	11,15	0,48
17	25,32	159,96	91,71	155,98	18,59	123,93	59,21	210,35	16,24	6,66
18	40,57	418,16	13,34	254,55	18,41	83,28	32,93	118,02	18,29	0,29
19	28,87	571,46	51,40	248,24	58,52	241,24	32,65	25,97	11,96	10,09

Таблица 3

Ошибка между истинными и найденными значениями для различных степеней мутации и заданной программе отделения

Время, с	Степень мутации										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1
0	127,6	316,8	104,1	190,912	118,815	231,876	203,508	223,508	279,620	353,6	266,5
1	34,1	729,7	72,9	143,485	362,471	454,825	359,301	159,301	105,575	746,6	613,0
2	10,3	465,2	23,5	162,233	383,981	370,900	387,237	187,237	137,470	534,6	430,6
3	96,7	255,8	33,4	0,001	61,592	18,156	256,475	56,475	97,376	391,8	294,0
4	186,5	184,6	6,1	11,768	0,000	0,000	0,001	0,001	0,034	250,1	6,8
5	102,1	253,0	497,1	0,005	0,004	0,001	0,006	0,003	0,008	177,7	3,2
6	18,4	141,9	249,3	1,119	0,002	0,003	0,001	0,006	0,015	122,4	3,8
7	188,8	193,9	52,0	0,340	0,004	0,003	0,000	0,003	0,071	0,0	2,6
8	498,1	335,9	44,2	2,961	0,021	0,001	0,001	0,003	0,008	1,7	27,7
9	541,7	477,5	60,8	0,001	0,004	0,004	0,022	0,004	0,077	333,5	0,2
10	839,9	200,3	46,0	1,359	0,002	0,004	0,002	0,005	0,131	9,0	1,4
11	1128,1	169,1	116,1	2,710	0,064	0,001	0,005	0,050	0,036	3,1	43,2
12	1219,1	8,1	13,4	0,013	0,128	0,032	0,017	0,052	0,153	2,9	0,3
13	1178,0	27,0	4,9	0,054	0,035	0,115	0,029	0,011	0,060	11,3	5,0
14	1200,0	15,5	1,4	0,660	0,011	0,025	0,052	0,012	0,097	1,4	54,4
15	1231,0	17,9	7,4	5,241	0,207	0,027	0,007	0,009	0,902	17,6	136,2
16	1280,0	62,4	10,2	3,174	0,000	0,258	0,110	0,051	0,276	22,4	28,2
17	1345,0	235,8	21,3	1,289	0,006	0,029	0,018	0,030	0,906	41,4	49,2
18	1432,0	320,1	87,5	2,902	0,138	0,091	0,219	0,527	1,094	1,5	180,8
19	1480,0	285,5	118,6	1,123	0,177	0,098	0,295	0,082	1,158	3,0	13,2

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 26
2020
№ 7

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

DOI 10.17587/issn.1684-6400

УЧРЕДИТЕЛЬ

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Деменков Н. П., Микрин Е. А., Мочалов И. А. Марковские и полумарковские процессы с нечеткими состояниями. Часть 2. Полумарковские процессы 387

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Беляков С. Л., Боженюк А. В., Зубков С. А. Метод интеллектуального управления процессом интерактивного изучения пространственных данных для принятия решений 394
- Гостюнина В. А., Давидюк Н. А. Разработка и исследование комбинированного метода классификации текстовой информации по деструктивным индикаторам 402

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Симаков С. П. Статистическое исследование генетического алгоритма дифференциальной эволюции для обработки оптических изображений 410

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭКОНОМИКЕ

- Маренко В. А. Модель характеристик экономической системы как конформируемый образ рассуждений аналитика 419

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Семенов В. В. Мониторинг информационной безопасности беспилотных транспортных средств с использованием цифрового акселерометра 424
- Мистров Л. Е., Головченко Е. В. Методологические основы оценки устойчивости функционирования авиационной информационной системы 430

Главный редактор:

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

Зам. главного редактора:

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

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:

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

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

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

INFORMATION TECHNOLOGIES INFORMACIONNYE TEHNOLOGII

Vol. 26
2020
No. 7

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

ISSN 1684-6400

CONTENTS

MODELING

- Demenkov N. P., Mikrin E. A., Mochalov I. A.** Markov and Semi-Markov Processes with Fuzzy States. Part 2. Semi-Markov Processes 387

INTELLIGENT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

- Belyakov S. L., Bozhenyuk A. V., Zubkov S. A.** The Method of Intelligent Control of the Process of Interactive Study of Spatial Data for Decision Making 394
- Gostyunina V. A., Davidyuk N. A.** Development and Research of a Combined Method for Classifying Textual Information by Destructive Indicators 402

DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

- Simakov S. P.** Statistical Study of the Differential Evolution Algorithm for Processing Optical Measurements 410

INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE ECONOMY

- Marenko V. A.** The Economic System Model as the Conformable Image of Analyst Reasoning 419

APPLIED INFORMATION TECHNOLOGIES

- Semenov V. V.** Monitoring of the Information Security State of Unmanned Vehicles by Using Digital Accelerometer 424
- Mystrov L. E., Golovchenko E. V.** Methodological Bases of Evaluation of the Sustainability of the Operation of the Aviation Information System 430

Editor-in-Chief:

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

Deputy Editor-in-Chief:

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

Chairman:

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

Editorial Board Members:

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

Editors:

Bezmenova M. Yu.

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

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

Н. П. Деменков, канд. техн. наук, доц., e-mail: dnp@bmstu.ru,

Е. А. Микрин, д-р. техн. наук, проф.,

И. А. Мочалов, д-р техн. наук, проф., e-mail: intelsyst@mail.ru,

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Марковские и полумарковские процессы с нечеткими состояниями. Часть 2. Полумарковские процессы¹

Рассмотрена немарковская модель случайного процесса, в которой на вход системы поступает простейший поток, а длительность между состояниями распределена по произвольному закону. Составлено уравнение связи полумарковского процесса с нечеткими и четкими состояниями. Приведены различные частные случаи такой связи, когда заданные треугольные функции принадлежности нечетких состояний модифицируются в их единичные аналоги, а ядра интегральных уравнений представляются показательным распределением. Описан процесс восстановления как частный случай полумарковского процесса и показано появление нечеткого интегрального уравнения.

Ключевые слова: полумарковский процесс, нечеткие состояния процесса, нечеткое интегральное уравнение

Введение

Марковские процессы занимают важное место в теории и практике прикладных дисциплин в технике, таких как теория надежности, массового обслуживания, теория восстановления, теория разрывных процессов и других. Во всех этих случаях используется простейшая модель, когда входящие потоки являются пуассоновскими, а длительность между соседними событиями потока, являющаяся случайной величиной, имеет экспоненциальное распределение. При таком представлении удается получить сравнительно простые марковские процессы и их вероятностные и числовые характеристики.

Однако с появлением более сложных систем возникла задача представления марковской модели в виде единичной модели, объединяющей простейшие марковские системы, что привело к постановке новых более сложных задач и к возникновению немарковских моделей. Одной из них является полумарковская модель, в которой на вход системы поступает простейший поток событий, а длительность между событиями распределена по произвольному закону [1–4].

Главная задача в этом случае состоит в нахождении элементов переходной матрицы состояний модели, каждый элемент которой представляется линейным интегральным уравнением Фредгольма II рода типа свертки относительно функции распределения длительности между событиями. Это приводит к линейной системе соответствующих интегральных уравнений, решение которой по методу преобразования Лапласа дает искомую функцию. Если число состояний модели равно n , то очевидно, что размерность системы интегральных уравнений будет равна n^2 .

При значительном n возникают сложности в нахождении стационарных режимов, определении начальных и центральных моментов и других характеристик. Один из способов уменьшения размерности модели, приводящего к упрощению вычислений, состоит в введении нечетких состояний, которые объединяют исходные состояния путем использования лингвистических термов типа "низкая", "средняя", "высокая" и т.п. размерности.

Впервые нечеткие термы были использованы при решении задачи принятия решений для марковских моделей, которые возникают в исследовании операций [5, 6]. Теория, предложенная в работе [5], использовалась для ана-

¹Часть 1 опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", 2020, т.21, № 6.

лиза функционирования импульсной системы автоматической оптимизации [7–10] методами марковских цепей с нечеткими состояниями. Идея уменьшения размерности путем введения в марковской цепи нечетких состояний реализована в дискретно-непрерывной марковской модели, представляемой уравнениями Колмогорова [11]. В этом случае используется факт близости разностного уравнения, представляющего цепи, и соответствующего дифференциального уравнения.

Интегральные уравнения, которые появляются в полумарковских процессах, широко применяются в моделях традиционной математики, например, при доказательстве теоремы существования и единственности решения дифференциальных уравнений, при представлении модели системы управления, охваченной обратной связью, при описании систем управления при воздействии на них возмущений и в других случаях.

Для решения интегральных уравнений используются приближенные и точные методы типа тейлоровской аппроксимации, приближение вырожденными ядрами, приближения Галеркина, Чебышева, наименьших квадратов и др. [12–16]. Применительно к нашей задаче представления переходной матрицы в виде системы линейных уравнений Фредгольма II рода типа свертки и ее решения используется метод преобразования Лапласа.

Целью настоящей работы является рассмотрение задачи о преобразовании переходной матрицы случайных переменных длительности между соседними событиями полумарковского процесса с четкими состояниями в процесс с нечеткими состояниями для стационарного случая, когда время процесса стремится в бесконечность; исследование частных случаев процесса для различных типов его ядер, а также формулировка некоторых типовых задач для полумарковских процессов с нечеткими состояниями.

Новизна предлагаемой работы состоит в разработке методики представления традиционного полумарковского процесса в процесс с нечеткими состояниями, что позволяет упростить вычисления его характеристик и представление их в нечетких терминах, обеспечивающих простоту интерпретации.

1. Постановка задачи

Пусть имеем систему $X(t)$, которая в каждый момент времени $t = t_i$, $i = \overline{1, n}$, может находиться в конечном числе фазовых состояний $X(t_i) = Y_i$:

$$X(t = t_1) = X_1, \dots, X(t = t_n) = X_n,$$

и одношаговые вероятности $p_{ij}(1)$ перехода из состояния x_i в X_j , задаваемые матрицей

$$P(1) = \{p_{ij}(1)\}, \quad i, j = \overline{1, n}.$$

Далее полагается, что процесс $X(t = t_m) = X_m$, $m = \overline{1, n}$, определяет марковскую однородную цепь, в которой поток событий имеет пуассоновское распределение. Сопоставим каждому ненулевому элементу $p_{ij}(1)$ переходной матрицы $P(1)$ случайную величину T_{ij} с неизвестной априори функцией распределения $F_{ij}(t) = F_{ij}(\tau < t)$ или плотностью вероятности $f_{ij}(t)$. В физических системах T_{ij} обычно трактуется как время ожидания системой $X(t)$, находящейся в состоянии X_i , до ее перехода в состояние X_j .

Согласно теории полумарковских процессов [2] при неизвестной $F_{ij}(t)$ элементы $\Phi_{ij}(t)$ переходной матрицы условных одношаговых вероятностей

$$\Phi(t) = \{\Phi_{ij}(t)\} = \{P(X(t) = X_j | X(t) = X_i)\}, \quad i, j = \overline{1, n},$$

находятся из системы линейных интегральных уравнений Фредгольма типа свертки:

$$\Phi_{ij}(t) = \delta_{ij} \Psi_i(t) + \sum_{j=1}^n p_{ij} \int_0^t f_{ij}(\tau) \Phi_{ij}(t - \tau) d\tau, \quad i, j = \overline{1, n},$$

$$\Psi_i(t) = 1 - F_i(t),$$

$$F_i(t) = P\{t_i < t\} = \sum_{j=1}^n p_{ij}(1) F_{ij}(t);$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j; \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad \text{— символ Кронекера.}$$

В краткой форме эти уравнения могут быть записаны в следующей матричной форме:

$$\Phi(t) = \Psi(t) + (P \otimes f) \Phi(t). \quad (1)$$

Здесь используются следующие обозначения: $\Phi(t) = \{\Phi_{ij}(t)\}$, $P = \{p_{ij}\}$; $f = \{f_{ij}\}$ — квадратные матрицы размерности $n \times n$; $\Psi(t) = \{\delta_{ij} \Psi_i(t)\}$ — диагональная матрица; $\otimes$ — специальный тип умножения матриц, когда $E = P \otimes f \Rightarrow e_{ij} = p_{ij} f_{ij}$.

В этих условиях необходимо решить следующие задачи:

1.1. По матрице $\Phi(t)$ получить матрицу $\Phi^f(t)$ с нечеткими состояниями.

1.2. Для найденной матрицы $\Phi^f(t)$ определить остальные нечеткие состояния.

1.3. Рассмотреть частные случаи задания ядра интегрального уравнения.

2. Методы решения уравнения с нечеткими состояниями

Для всех перечисленных задач по п. 1.1–1.3 используется известное соотношение между четкими и нечеткими состояниями марковского процесса [5], преобразование Лапласа для четких переменных [17] и решение интегральных уравнений с известными типами их ядер в виде переходных вероятностей: дельта, показательная и константы.

2.1. Получение нечеткой матрицы с нечеткими состояниями

Для решения задачи 1.1 имеем с точностью до обозначений связь нечетких и четких состояний в виде [5]

$$\Phi^f(t) = \Delta \Gamma^T \Phi(t) \Gamma, \quad (2)$$

где $\Phi(t)$ — квадратная матрица с элементами $\Phi_{ij}(t)$, определяемыми по соотношению (1), $\dim \Phi(t) = n \times n$; $\Gamma = \{r(X_j^f)\}$ — прямоугольная матрица связи четких $j = \overline{1, n}$ и нечетких $j = \overline{1, m} < n$ состояний посредством заданных функций принадлежности $r^f(X_j)$, $\dim \Gamma = (n \times m)$; $\Delta = \text{diag} \Delta = \{\Delta_i\}$ — диагональная матрица с элементами, зависящими от четких равновероятных (с вероятностью n^{-1}) начальных условий, $\dim \Delta = m \times m$; $\Phi^f(t)$ — переходная квадратная матрица нечетких состояний, $\dim \Phi^f(t) = m \times m$, $m < n$.

Для уменьшения громоздких преобразований и вычислений положим $n = 3$, $m = 2$, дискретные нечеткие множества задаем треугольными функциями принадлежности:

$$\begin{aligned} r(X_1^f) &= (1 \mid X_1 + 0,5 \mid X_2 + 0 \mid X_3); \\ r(X_2^f) &= (0 \mid X_1 + 0,5 \mid X_2 + 1 \mid X_3), \end{aligned}$$

начальные условия в виде равновероятных событий с вероятностью $n^{-1} = 1/3$, тогда выражение (2) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \Phi^f(t) &= \underbrace{\begin{pmatrix} m_{f_1}^{-1} & 0 \\ 0 & m_{f_2}^{-1} \end{pmatrix}}_{\Delta} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0,5 & 1 \end{pmatrix}}_{\Gamma^T} \times \\ &\times \underbrace{\begin{pmatrix} \Phi_{11}(t) & \Phi_{12}(t) & \Phi_{13}(t) \\ \Phi_{21}(t) & \Phi_{22}(t) & \Phi_{23}(t) \\ \Phi_{31}(t) & \Phi_{32}(t) & \Phi_{33}(t) \end{pmatrix}}_{\Phi(t)} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0,5 & 0,5 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\Gamma}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} m_{f_1}^{-1} &= \left[\sum_{i=1}^3 r_{f_1}(X_i) \right]^{-1} = [1 + 0,5 + 0]^{-1} = 2/3; \\ m_{f_2}^{-1} &= \left[\sum_{i=1}^3 r_{f_2}(X_i) \right]^{-1} = [0 + 0,5 + 1]^{-1} = 2/3. \end{aligned}$$

В результате вычислений получим переходную матрицу $\Phi^f(t)$ процесса с нечеткими состояниями X_i^f , $i = 1, 2$:

$$\Phi^f(t) = \begin{pmatrix} X_1^f & X_2^f \\ \Phi_{11}^f & \Phi_{12}^f \\ \Phi_{21}^f & \Phi_{22}^f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1^f \\ X_2^f \end{pmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} \Phi_{11}^f(t) &= 2/3[\Phi_{11}(t) + 0,5(\Phi_{12}(t) + \\ &+ \Phi_{21}(t)) + 0,25\Phi_{22}(t)]; \\ \Phi_{12}^f(t) &= 2/3[\Phi_{13}(t) + 0,5(\Phi_{12}(t) + \\ &+ \Phi_{23}(t)) + 0,25\Phi_{22}(t)]; \\ \Phi_{21}^f(t) &= 2/3[\Phi_{31}(t) + 0,5(\Phi_{21}(t) + \\ &+ \Phi_{32}(t)) + 0,25\Phi_{22}(t)]; \\ \Phi_{22}^f(t) &= 2/3[\Phi_{33}(t) + 0,5(\Phi_{23}(t) + \\ &+ \Phi_{32}(t)) + 0,25\Phi_{22}(t)]. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $\Phi_{ij}(t)$ ($i, j = \overline{1, 3}$) — элементы заданной переходной матрицы $\Phi(t)$ процесса с четкими состояниями X_i , $i = \overline{1, 3}$, а $\Phi_{ij}^f(t)$ — интегральные уравнения (1).

Аналитическое решение системы интегральных уравнений (1) получается путем применения преобразования Лапласа (L):

$$\begin{aligned} L[\Phi(t)] &= L[\Psi(t) + (P \otimes f)\Phi(t)] \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \Phi^*(s) = \Psi^*(s) + [P \otimes f^*(s)]\Phi^*(s) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \Phi^*(s) = [I - P \otimes f^*(s)]^{-1} \Psi^*(s), \end{aligned} \quad (4)$$

где I — единичная матрица.

Введем в рассмотрение векторы

$$c_1 = (1 \ 0 \ 0), c_2 = (0 \ 1 \ 0)^T, c_3 = (0 \ 0 \ 1)^T,$$

тогда преобразование (4) в пространстве изображений будет иметь вид

$$\Phi^{f*}(s) = \{\Phi_{ij}^{f*}(s)\}, (i, j) = 1, 2, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi_{11}^{f*}(s) &= (2/3)[c_1^T \Phi^*(s) c_1 + 0,5(c_2^T \Phi^*(s) c_2 + \\ &+ c_2 \Phi^*(s) c_1) + 0,25c_2^T \Phi^*(s) c_2]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_{12}^{f*}(s) &= (2/3)[c_2^T \Phi^*(s)c_2 + 0,5(c_2^T \Phi^*(s)c_2 + \\ &+ c_2 \Phi^*(s)c_3) + 0,25c_2^T \Phi^*(s)c_2]; \\ \Phi_{21}^{f*}(s) &= (2/3)[c_3^T \Phi^*(s)c_3 + 0,5(c_2^T \Phi^*(s)c_2 + \\ &+ c_2 \Phi^*(s)c_3) + 0,25c_2^T \Phi^*(s)c_2]; \\ \Phi_{22}^{f*}(s) &= (2/3)[c_3^T \Phi^*(s)c_3 + 0,5(c_2 \Phi^*(s)c_3 + \\ &+ c_2 \Phi^*(s)c_1) + 0,25c_3^T \Phi^*(s)c_2].\end{aligned}$$

2.2. Определение стационарного режима

Для матрицы с нечеткими состояниями находится стационарный режим, когда $t \rightarrow \infty$ ($s \rightarrow 0$):

$$\Phi^f(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \Phi^f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s\Phi^f(s).$$

Как следует из выражения (5), элементы $\Phi^{f*}(s)$ зависят от $\Phi^*(s)$, поэтому для нахождения $\lim_{s \rightarrow 0} \Phi^{f*}(s)$ первоначально ищется $\lim_{s \rightarrow 0} \Phi^*(s)$, а затем осуществляется переход к исходному пределу. Из (5) имеем [2]:

$$\begin{aligned}\Phi(\infty) &= \lim_{s \rightarrow 0} s\Phi^*(s) = \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \{s[I - P \otimes f^*(s)]^{-1} \Psi^*(s)\} = \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \{s[I - P \otimes f^*(s)]^{-1}\} \lim_{s \rightarrow 0} \Psi^*(s).\end{aligned}\quad (6)$$

Находятся пределы каждого из сомножителей. Для диагональной матрицы $\Psi(s)$ из уравнения (1) имеем:

$$\begin{aligned}\Psi(t) &= \{\Psi_i(t)\} = \left\{ \int_t^\infty \omega_i(t) dt = P(T_i > 1) \right\}, \\ \omega_i(t) &= \sum_{j=1}^n p_{ij} f_{ij}(t),\end{aligned}$$

поэтому преобразование Лапласа дает

$$\begin{aligned}L[\Psi(t)] &= \{L[\Psi_i(t)]\} = \\ &= \{s^{-1}[1 - \omega_i^*(s)]\} = s^{-1}[I - W(s)],\end{aligned}$$

отсюда

$$\lim_{s \rightarrow 0} \Psi^*(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \{s^{-1}[I - W^*(s)]\}.$$

Этот предел дает неопределенность типа $\frac{0}{0}$. Используя правило Лопиталя раскрытия неопределенности, находим

$$\lim_{s \rightarrow 0} \Psi^*(s) = \frac{\partial}{\partial s} \Psi^*(s=0) = T,$$

где T — диагональная матрица среднего $\langle \cdot \rangle$ времени ожидания в каждом из состояний:

$$\langle T_i \rangle = \int_0^\infty t \omega_i(t) dt = \sum_{j=1}^n p_{ij} \langle T_j \rangle.$$

Для первого сомножителя в соотношении (6) имеем цепочку эквивалентных соотношений:

$$\begin{aligned}H(s) &= s[I - P \otimes f^*(s)]^{-1} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow H(s)[I - P \otimes f^*(s)] &= sI \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow H(s) - H(s) \cdot P \otimes f^*(s) &= sI,\end{aligned}\quad (7)$$

поэтому

$$\lim_{s \rightarrow 0} H(s) - \lim_{s \rightarrow 0} H(s) \cdot \lim_{s \rightarrow 0} [P \otimes f^*(s)] = \lim_{s \rightarrow 0} sI.$$

Далее учитывая, что значения пределов

$$\begin{aligned}\lim_{s \rightarrow 0} sI &= 0, \lim_{s \rightarrow 0} f^*(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \{L[f_{ij}^*(t)]\} = \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \left\{ \int_0^\infty e^{-st} f_{ij}(t) dt \right\} = E,\end{aligned}$$

где E — матрица, все элементы которой равны единице, и, применяя определенную выше операцию $\otimes$ умножения матриц, будем иметь:

$$\lim_{s \rightarrow 0} H(s) - H(s=0) \cdot P = 0 \Leftrightarrow \lim_{s \rightarrow 0} H(s) = H(0) \cdot P.$$

Таким образом, из соотношения (6) получим

$$\Phi^*(t \rightarrow \infty) = \{\Phi_{ij}(\infty)\} = H(0)P \cdot T. \quad (8)$$

Теперь согласно уравнению для финальных вероятностей $\Phi(\infty)$ вложенной цепи Маркова имеем

$$\Phi_i(\infty)P(1) = \Phi_i(\infty), \quad \sum_{i=1}^3 \Phi_i(\infty) = 1.$$

Сравнение этого уравнения с уравнением (8) показывает, что в качестве решения (7) может быть использована квадратная матрица $H(0)_{(3 \times 3)}$, строки $H_i = (h_{i1}, h_{i2}, h_{i3})$ которой пропорциональны матрице-строке $P = (p_1, p_2, p_3)$ [2]:

$$H_i = k_i P, \quad k_i \in R, \quad i = \overline{1, 3},$$

поэтому (6) с учетом (7) будет иметь вид

$$\Phi(t \rightarrow \infty) = H(s=0)T.$$

Это означает, что элементы матрицы $\Phi(t \rightarrow \infty)$ удовлетворяют соотношению

$$\Phi_{ij}(\infty) = h_{ij}(0) \langle T_j \rangle = k_i p_j \langle T_j \rangle. \quad (9)$$

Коэффициенты k_i находятся из условия нормировки ортогональных вероятностей:

$$\sum_{j=1}^3 \Phi_{ij}(\infty) = k_i \sum_{j=1}^3 p_j \langle T_j \rangle \equiv 1,$$

откуда:

$$k_i = \left[\sum_{j=1}^3 p_j \langle T_j \rangle \right]^{-1}.$$

В результате из соотношения (9) получаем

$$\begin{aligned} \{\Phi_{ij}(\infty)\} &= \left\{ \left[\sum_{j=1}^3 p_j \langle T_j \rangle \right]^{-1} p_j \langle T_j \rangle \right\} = \\ &= \{\Phi_{ij}^*(s=0)\} = \Phi^*(s=0), \quad i, j = \overline{1,3}, \end{aligned}$$

где

$$\langle T_j \rangle = \int_0^\infty t \omega_j(t) dt, \quad \omega_j(t) = \sum_{i=1}^3 p_{ij} f_{ij}(t), \quad j = \overline{1,3},$$

что позволяет из выражения (5) определить матрицу стационарных вероятностей $\Phi^{f*}(s=0)$ для нечетких $f=2$ состояний.

2.3. Задание ядра интегрального уравнения

Рассмотрим частные случаи заданий ядра интегрального уравнения с нечеткими состояниями и функциями принадлежности $r(X_j^f)$, $j = \overline{1,3}$.

Пусть имеем:

$$r(X_1^f) = (1/X_1 + 0/X_2 + 0/X_3);$$

$$r(X_2^f) = (0/X_1 + 1/X_2 + 0/X_3);$$

$$r(X_3^f) = (0/X_1 + 0/X_2 + 1/X_3),$$

тогда матрицы Γ , Γ^T будут равны:

$$\Gamma = \Gamma^T = I_{(3 \times 3)}.$$

Матрица Δ в этом случае будет равна единичной $\Delta = I_{(3 \times 3)}$, поэтому очевидно, что $\Phi^f(t) = \Delta \Gamma^T \Phi(t) \Gamma = I \Phi(t) I = \Phi(t)$.

А. Если теперь положить, что ядро уравнения f_{ij} равно

$$f_{ij}(t) = \delta(t-1) \Rightarrow f_{ij}^*(s) = e^{-s},$$

то далее, как показано в работе [2], получим

$$\Phi(t) = P^n, \quad n \leq t \leq n+1.$$

Таким образом, полумарковский процесс обобщает цепь Маркова.

Б. Если теперь положить $f_{ij}(t) = \vartheta e^{-\vartheta t} \Rightarrow f_{ij}^*(s) = \vartheta/(s+\vartheta)$, тогда [1]

$$\Phi(t) = \exp[-\vartheta(I-P)t].$$

Полумарковский процесс обобщает дискретно-непрерывный марковский процесс.

В. Модель процесса восстановления часто используется для представления системы надежности, в которой отказавший элемент заменяется новым, например, в задачах управления водными ресурсами, в задаче о счетчиках при изучении космических лучей и других [18, 19].

Принято различать следующие типы процессов [2]: простые, модифицированные и стандартные. К модифицированному процессу относится альтернирующий процесс восстановления, который характеризуется наличием процесса, получаемого из двух взаимонезависимых процессов. Первый из них начинается с процесса 1-го типа, в конце его имеется событие 1-го типа, а затем за ним следует процесс 2-го типа, в конце которого появляется событие 2-го типа, затем снова 1-й тип, который сменяется вторым и т.д. Полагают, что смена типов может быть представлена цепью Маркова с двумя состояниями и с известной матрицей перехода.

Покажем, что полумарковский процесс при определенных условиях представляет собой альтернирующий процесс восстановления [2].

Имеем:

$$P = \{p_{ij}\} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \end{matrix},$$

плотности вероятностей соответствующих времен ожидания:

$$f_{12}(t) = \vartheta_2 \exp(-\vartheta_2 t) \leftrightarrow f_{12}^*(s) = \vartheta_2 (s + \vartheta_2)^{-1};$$

$$f_{21}(t) = \vartheta_1 \exp(-\vartheta_1 t) \leftrightarrow f_{21}^*(s) = \vartheta_1 (s + \vartheta_1)^{-1}.$$

В этих условиях из основного уравнения полумарковского процесса (4) будем иметь:

$$\begin{aligned} \Phi^*(s) &= s^{-1} \{ [I - P \otimes f^*(s)]^{-1} \psi(s) \} = \\ &= s^{-1} \left\{ \left[\frac{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}}{I} - \frac{\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}}{P} \otimes \frac{\begin{pmatrix} 0 & f_{12}^*(s) \\ f_{21}^*(s) & 0 \end{pmatrix}}{f^*(s)} \right]^{-1} \times \right. \\ &\quad \left. \times \frac{\begin{pmatrix} 1 - f_{12}^*(s) & 0 \\ 0 & 1 - f_{21}^*(s) \end{pmatrix}}{\psi^*(s)} \right\} = \\ &= [s(s + \vartheta_1 + \vartheta_2)]^{-1} \begin{pmatrix} s + \vartheta_1 & \vartheta_2 \\ \vartheta_1 & s + \vartheta_2 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

отсюда получим:

$$Z^{-1}[\Phi^*(s)] = \Phi(t) = (\vartheta_1 + \vartheta_2)^{-1} \times \\ \times \begin{pmatrix} \vartheta_1 + \vartheta_2 \exp[-(\vartheta_1 + \vartheta_2)t] & \vartheta_2(1 - \exp[-(\vartheta_1 + \vartheta_2)t]) \\ \vartheta_1(1 - \exp[-(\vartheta_1 + \vartheta_2)t]) & \vartheta_2 + \vartheta_1 \exp[-(\vartheta_1 + \vartheta_2)t] \end{pmatrix}.$$

При $t = 0$ и $t \rightarrow \infty$ соответственно имеем:

$$\Phi(t = 0) \equiv P; \quad \Phi(t \rightarrow \infty) = \\ = \begin{pmatrix} \vartheta_1(\vartheta_1 + \vartheta_2)^{-1} & \vartheta_2(\vartheta_1 + \vartheta_2)^{-1} \\ \vartheta_1(\vartheta_1 + \vartheta_2)^{-1} & \vartheta_2(\vartheta_1 + \vartheta_2)^{-1} \end{pmatrix} = \\ = (\Phi_1, \Phi_2)^T |_{\Phi_2 = \Phi_1} = \Phi_1.$$

Это означает, что в заданных условиях полумарковский процесс обобщает альтернирующий процесс восстановления для двух типов процессов X_1 , X_2 , которые сменяют друг друга в соответствии с матрицей P с заданными стационарными вероятностями

$$\Phi_1 = (\vartheta_1(\vartheta_1 + \vartheta_2)^{-1}, \vartheta_2(\vartheta_1 + \vartheta_2)^{-1}).$$

Г. Пусть теперь в соотношении (2) имеем:

$$r(X_1^f) = (1/X_1 + 0/X_2 + 0/X_3); \\ r(X_2^f) = r(X_3^f) = (0/X_1 + 0/X_2 + 0/X_3);$$

тогда из (1) получим ($i, j = 1$):

$$\Phi_{11}^f(t) = \Phi_{11}(t) - \delta_{11}\psi_1(t) + p_{11} \int_0^t f_{11}(\tau) \cdot \Phi(t - \tau) d\tau$$

или для упрощения записи, опуская индексы и учитывая, что $f_{11}(\cdot)$, $\psi_1(\cdot)$ зависят от $\Phi_{11}^f(\cdot)$, а $\delta_{11} = 1$, будем иметь:

$$\Phi(t) = \psi(t) + p \int_0^t f(\tau) \cdot \Phi(t - \tau) d\tau.$$

Это означает, что исходное четкое матричное интегральное уравнение превращается в одномерное, которое является нечетким, так как $\Phi(t) = \Phi^f(t)$, где f — индекс нечеткости. Для его упрощения используются основные положения теории нечетких интегральных уравнений: определение нечеткого уравнения; существование и единственность его решения; методы решения и другие вопросы [12–16]. Далее, так как в результате получается нечетное интегральное уравнение свертки, то для его решения обычно используется нечеткое преобразование Лапласа, теория и практика которого изложены в работах [20, 21].

Заключение

Рассмотрена немарковская модель случайного процесса, в которой на вход системы поступает простейший поток, а длительность между состояниями распределена по произвольному закону. Составлено уравнение связи полумарковского процесса с нечеткими и четкими состояниями. Приведены различные частные случаи такой связи, когда заданные треугольные функции принадлежности нечетких состояний модифицируются в их единичные аналоги, а ядра интегральных уравнений представляются показательным распределением. Описан процесс восстановления как частный случай полумарковского процесса и показано появление нечеткого интегрального уравнения.

Рассмотренная тема о нечетких состояниях случайного процесса весьма актуальна применительно к развитию общей теории нечетких случайных процессов, в частности, в модификации четкого полумарковского процесса в его нечеткий аналог. Это позволило с единой позиции представить непрерывный и дискретный процессы восстановления в нечеткой трактовке.

Другой задачей, связанной с нечеткими процессами, является рассмотрение нечетких дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа, которые появляются в виде задачи о нечеткой реализации процесса при нахождении нечеткой траектории некоторой частицы

Список литературы

1. Саати Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. М.: Сов. радио, 1971. 520 с.
2. Тихонов В. И., Миронов М. А. Марковские процессы. М.: Сов. радио, 1977. 488 с.
3. Тихоненко О. М. Модели массового обслуживания в информационных системах. Минск: Технопринт, 2003. 326 с.
4. Ивченко Г. И., Каштанов В. А., Коваленко И. Н. Теория массового обслуживания. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2012. 304 с.
5. Bhattacharyya Malay. Fuzzy markovian decision process // Fuzzy sets and systems. 1998. N. 99. P. 273–282.
6. Волков И. К., Загоруйко Е. А. Исследование операций. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 435 с.
7. Растринин Л. А. Системы экстремального управления. М.: Наука, 1974. 632 с.
8. Медведев Г. А., Тарасенко В. П. Вероятностные методы исследования экстремальных систем. М.: Наука, 1967. 456 с.
9. Казакевич В. В., Родов Н. Б. Системы автоматической оптимизации. М.: Энергия, 1977. 280 с.
10. Романовский И. В. Алгоритмы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1977. 352 с.
11. Деменков Н. П., Микрин Е. А., Мочалов И. Н. Марковские и полумарковские процессы с нечеткими состояниями. Часть 1. Марковские процессы // Информационные технологии. 2020. Т. 26, № 6. С. 323–334.

12. Park J. Y., Jeong J. U. On existence and uniqueness of solution of fuzzy Volterra-Fredholm integral equation // *Fuzzy sets and systems*. 2000. Vol. 115. P. 425–431.
13. Jahantigh M., Allahviaranloo T., Otadi M. Numerical solution of fuzzy integral equation // *Applied mathematical sciences*. 2008. Vol. 2, N. 1. P. 33–46.
14. Friedman M., Ming M., Kandel A. Fuzzy linear systems // *Fuzzy Sets and Systems*. 1998. N. 96. P. 201–209.
15. Jafarian A., S. Measoomy Nia, Tavan S., Banifazel M. Solving linear Fredholm fuzzy integral equations systems by Taylor expansion method // *Applied mathematical sciences*. 2012. Vol. 6, N. 83. P. 4103–4117.
16. Jafarian A., S. Measoomy Nia, Tavan S. A numerical scheme to solve fuzzy linear Volterra integral equations systems // *Jornal of applied mathematics*. Vol. 2012, art ID 216923. 17 p.

17. Деменков Н. П., Микрин Е. А. Управление в технических системах. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. 452 с.
18. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 1. М.: Мир, 1967. 432 с.
19. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 2. М.: Мир, 1967. 753 с.
20. Деменков Н. П., Микрин Е. А., Мочалов И. А. Нечеткое преобразование Лапласа в задачах нечеткого математического моделирования. Часть 1 // *Информационные технологии*. 2017. Т. 23, № 4. С. 251–285.
21. Деменков Н. П., Микрин Е. А., Мочалов И. А. Нечеткое преобразование Лапласа в задачах нечеткого математического моделирования. Часть 2 // *Информационные технологии*. 2017. Т. 23, № 5. С. 362–369.

N. P. Demenkov, Ph.D. Tech. Sciences, Associate Professor, e-mail: dnp@bmstu.ru,
E. A. Mikrin, Dr. Tech. Sciences, Professor,
 I. A. Mochalov, Dr. Tech. Sciences, Professor, e-mail: intelsyst@mail.ru,
 Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Markov and Semi-Markov Processes with Fuzzy States. Part 2. Semi-Markov Processes

A non-Markov model of a random process is considered, in which a simple stream arrives at the input of the system, and the duration between states is distributed according to an arbitrary law. The equation of the connection of the semi-Markov process with fuzzy and clear states is compiled. Various particular cases of such a connection are given, when the given triangular membership functions of fuzzy states are modified into their unit analogues, and the kernels of the integral equations are represented by an exponential distribution. A description of the recovery process as a special case of the semi-Markov process and the appearance of a fuzzy integral equation is presented.

Keywords: semi-Markov process, fuzzy states of the process, fuzzy integral equation

DOI: 10.17587/it.26.387-393

References

1. Saati T. L. E'lementy' teorii massovogo obsluzhivaniya i ee prilozheniya, Moscow, Sov. radio, 1971, 520 p. (in Russian).
2. Tixonov V. I., Mironov M. A. Markovskie processy, Moscow, Sov. Radio, 1977, 488 p. (in Russian).
3. Tixonenko O. M. Modeli massovogo obsluzhivaniya v informacionny'x sistemax, Minsk, Texnoprint, 2003. 326 p. (in Russian).
4. Ivchenko G. I. Kashtanov V. A., Kovalenko I. N. Teoriya masovogo obsluzhivaniya, Moscow, Knizhny'j dom "LIBROKOM", 2012, 304 p. (in Russian).
5. Bhattacharyya Malay. Fuzzy markovian decision process, *Fuzzy sets and systems*, 1998, no. 99, pp. 273–282.
6. Volkov I. K., Zagorujko E. A. Issledovanie operacij, Moscow, Publishing house of MGTU im. N.E'. Bauman, 2000, 435 p. (in Russian).
7. Rastrigin L. A. Sistemy' e'kstremal'nogo upravleniya, Moscow, Nauka, 1974, 632 p. (in Russian).
8. Medvedev G. A., Tarasenko V. P. Veroyatnostny'e metody' issledovaniya e'kstremal'ny'x system, Moscow, Nauka 1967, 456 p. (in Russian).
9. Kazakevich V. V. Rodov N. B. Sistemy' avtomaticheskoy optimizacii, Moscow, E'nergiya, 1977, 280 p. (in Russian).
10. Romanovskij I. V. Algoritmy' resheniya e'kstremal'ny'x zadach, Moscow, Nauka, 1977, 352 p. (in Russian).
11. Demenkov N. P., Mikrin E. A., Mochalov I. N. Markovskie i polumarkovskie processy' s nechetkimi sostoyaniyami. Chast' 1. Markovskie processy', *Informacionnye Texnologii*, 2020, vol. 26, no. 6, pp. 323–334 (in Russian).

12. Park J. Y., Jeong J. U. On existence and uniqueness of solution of fuzzy Volterra-Fredholm integral equation, *Fuzzy sets and systems*, 2000, 115, pp. 425–431.
13. Jahantigh M., Allahviaranloo T., Otadi M. Numerical solution of fuzzy integral equation, *Applied Mathematical Sciences*, 2008, vol. 2, no. 1, pp. 33–46.
14. Friedman M., Ming M., Kandel A. Fuzzy linear systems, *Fuzzy Sets and Systems*, 1998, no. 96, pp. 201–209.
15. Jafarian A. 1, S. Measoomy Nia, Tavan S., Banifazel M. Solving linear Fredholm fuzzy integral equations systems by Taylor expansion method, *Applied Mathematical Sciences*, 2012, vol. 6, no. 83, pp. 4103–4117.
16. Jafarian A., S. Measoomy Nia, Tavan S. A numerical scheme to solve fuzzy linear Volterra integral equations systems, *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2012, art ID 216923, 17 p.
17. Demenkov N. P., Mikrin E. A. Upravlenie v texnicheskix sistemax, Moscow, Publishing house of MGTU im. N.E'. Bauman, 2017, 452 p. (in Russian).
18. Feller V. Vvedenie v teoriyu veroyatnostej i eyo prilozheniya. T. 1, Moscow, Mir, 1967, 432 p. (in Russian).
19. Feller V. Vvedenie v teoriyu veroyatnostej i eyo prilozheniya. T. 2, Moscow, Mir, 1967, 753 p. (in Russian).
20. Demenkov N. P., Mikrin E. A., Mochalov I. A. Nечetkoe преобразование Лапласа в задачах нечеткого математического моделирования. Част' 1, *Informacionnye Texnologii*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 251–285 (in Russian).
21. Demenkov N. P., Mikrin E. A., Mochalov I. A. Nечetkoe преобразование Лапласа в задачах нечеткого математического моделирования. Част' 2, *Informacionnye Texnologii*, 2017, vol. 23, no. 5, pp. 362–369 (in Russian).

С. Л. Беляков, д-р техн. наук, проф., e-mail: beliacov@yandex.ru,

А. В. Боженюк, д-р техн. наук, проф., e-mail: avb002@yandex.ru,

Южный федеральный университет,

С. А. Зубков, ст. научн. сотр., e-mail: szubkov@sfnu.ru,

Научно-технический центр Интех Южного федерального университета

Метод интеллектуального управления процессом интерактивного изучения пространственных данных для принятия решений¹

Рассматривается задача организации совместной работы пользователя и геоинформационной системы при выработке решения в пространственно заданной ситуации. Предлагается метод решения, основанный на использовании двухкомпонентной модели контекста в виде ядра и набора допустимых преобразований ядра, сохраняющих смысл контекста. Приведены результаты экспериментального исследования макета интеллектуальной системы для управления интерактивным анализом.

Ключевые слова: принятие решений, визуальный анализ, интеллектуальное управление, геоинформационный сервис

Введение

Интерактивное изучение географических карт, схем и планов применяется для принятия решений в самых различных сферах бизнеса, производства и планирования. Необходимый инструмент для визуального анализа предоставляют геоинформационные системы (ГИС). Пользователь-аналитик и ГИС образуют систему, позволяющую решать трудно формализуемые задачи. Нахождению решения всегда предшествует визуальный анализ картографических материалов. В ходе анализа пользователь стремится достичь уровня ситуационной осведомленности, достаточного для принятия обоснованного решения. В осуществлении этой задачи ГИС оказывает аналитику информационную поддержку, предоставляя пространственные данные по его запросу. Интерактивное взаимодействие в рассматриваемой ситуации требует согласованности смыслового содержания потока картографических данных и целевой направленности поиска решения. Трудность поддержания согласованности возникает при решении нестандартных и трудно формализуемых задач. Из-за неопределенности,

неоднозначности и неполноты представления о возникшей проблеме пользователь-аналитик вынужден применять метод проб и ошибок. Первоначальная постановка задачи и поиск ее решений сменяются новой формулировкой цели поиска и повторной генерацией решений. В таких условиях достаточно вероятно, что ранее отобранные для анализа данные теряют полезность. В этом суть рассогласования. Работа по перенастройке средств поиска и модификации данных провоцирует когнитивную перегрузку и снижает качество принятых решений.

В данной работе предлагается метод управления ходом анализа, основанный на манипулировании аналитиком и ГИС рабочей областью визуального анализа. Рабочей считается локальная область карты ГИС, которую пользователь анализирует в сеансе. Рабочая область, с одной стороны, отражает состояние и поведение аналитика, с другой — воздействует на него и принимаемые им решения через созданные ГИС изображения. Особенностью предлагаемого подхода является использование знаний экспертов о проведении анализа.

1. Обзор публикаций по теме

Традиционная картографическая визуализация [1, 2] является базой картографического анализа ситуаций, требующих принятия ре-

¹Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00074 и № 20-01-00197.

шений. Она основана на создании и повторном использовании специализированных тематических карт. Каждая тематическая карта соответствует некоторому классу задач и хранится в ГИС как информационный объект, представляющий картографические сущности, слои, шаблоны связи и ссылки на внешние источники данных, виды и форматы [3,4]. Рабочая область анализа представляет собой явно выбранную аналитиком тематическую карту. Любые модификации рабочей области выполняются пользователем в одностороннем порядке, без реагирования на них со стороны ГИС. Методы визуализации концентрируются на способах осмотра рабочей области и не учитывают ее смысловое наполнение.

Контроль восприятия изображения отсутствует. Число объектов и связей на изображении не учитывается, хотя это существенно влияет на восприятие. Таким образом, существующие методы картографической визуализации не ставят своей целью оптимизацию диалога. Процесс анализа всего лишь следует паттерну анализа, который заложен в тематическую карту.

Следует учитывать, что процесс анализа в системе аналитик—ГИС должен соответствовать определенным психологическим закономерностям, поскольку конечный результат совместной работы существенно определяется ментальным когнитивным процессом в сознании аналитика. Известный закон Хика (Hick's law [5]) указывает на возрастание времени принятия решения при увеличении числа и сложности рассматриваемых вариантов. Причиной является рост когнитивной нагрузки на пользователя. При анализе картографических изображений это проявляется в снижении динамичности рассмотрения карты или схемы ситуации. В то же время известно [6], что рассмотрение в различных ракурсах, масштабах, панорамированием картографического фрагмента является фундаментальным психическим процессом, необходимым аналитику для понимания смысла увиденного. Представление о том, что в процессе интерактивного визуального анализа восприятие играет важнейшую роль, согласуется с современными представлениями о влиянии визуализации на творческое поведение (creativity) [7]. Результаты данных работ указывают на необходимость минимизации когнитивной нагрузки, но не дают реального пути решения проблемы.

Важные общие закономерности выявлены в исследовании восприятия и запоминания информации. Известно исследование "фрагментации", влияющей на восприятие и запоминание информации [8]. Для визуального анализа карт,

схем и планов фрагментация означает структурированность представления. Элементами такой структуры должны стать пространственно-временные объекты и отношения, а связи между ними должны отображать значимость элементов для задачи анализа. Реализация "фрагментации" по понятным причинам требует дополнительного исследования.

Отметим также работы по проектированию, основанному на опыте диалога (User experience design, UX, UXD, UED), направленные на изучение поведения пользователя. В частности, закон Джейкоба (Jacob's law of Internet UX [9]) говорит о том, что профессионально ориентированные группы пользователей обладают неким общим интуитивным представлением о полезных интерфейсах. Так как картографические изображения можно рассматривать как интерфейс для получения пространственной информации, эта закономерность порождает гипотезу о существовании знаний о полезности изображений. Вопрос о форме их представления и способе получения остается открытым.

Интерактивный визуальный анализ больших данных является предметом активных исследований на границе психологии и UX. Примером является работа [10], в которой анализируется роль визуального анализа в современном понимании цифрового творчества ("digital creativity") применительно к анализу больших данных. Авторы, в частности, исследуют процесс формирования ментального образа проблемы как цикл рассмотрения изображения и переосмысления постановки прикладной задачи. Поиск технической реализации процесса целенаправленного формирования ментального образа является продолжением данного исследования.

Главным средством построения эффективных решений поставленной прикладной задачи в системе аналитик—ГИС является ситуационная осведомленность пользователя-аналитика [11]. Осознание цели, генерация соответствующих поставленной цели подзадач, поиск их решений через восприятие информации о ситуации реального мира, прогнозирование развития ситуации — таковы компоненты ситуационной осведомленности [12]. Достижение максимальной ситуационной осведомленности представляет собой научную и практическую проблему, которая решается уже много лет в технике, психологии, инженерии и дизайне [13]. Исследования средств диалога с техническими системами концентрируются на анализе когнитивных процессов при разрешении сложных ситуаций, в которых задействован оператор. Целью анализа является нахождение наилучшего распределения когнитивной на-

грузки в человеко-машинной системе за счет применения искусственного интеллекта [14]. Соответственно этому распределению конструируется интерфейс. Для рассматриваемой в данной работе задачи эти результаты должны быть адаптированы с учетом специфичности картографического анализа.

Особый подход к управлению изучением карт предлагается в неокартографии [15] и киберкартографии [16]. Неокартография возникла как особый способ представления пространственных данных геоинформационными сервисами, направленный на повышение уровня ситуационной осведомленности пользователя. Трудоемкость компоновки рабочей области анализа, необходимость принимать решение в жестких временных рамках стали причиной перехода к непрерывным (растровым) моделям земной поверхности. Анализируя данный принцип диалогового взаимодействия, можно заключить, что фотореалистичность отображения земной поверхности действительно порождает у пользователя яркие образы реального мира. Но внешняя привлекательность интерфейса не компенсирует недостаточный объем числовых и символьных атрибутов объектов и отношений, что на самом деле ограничивает ситуационную осведомленность. Исследования визуализации в указанных работах следует рассматривать как частное решение общей проблемы сложности интерактивного анализа геоданных.

Последние исследования в области визуальной информатики привели к идее интеллектуального управления процессом анализа. В работе [17] приведен обзор научных работ, связанных с принятием решений на основе визуальной аналитики. Акцентируется идея о том, что визуальный анализ сложных ситуаций перестает быть вспомогательным инструментом принятия решений. Он становится главным компонентом, который берет на себя управление процессом решения прикладной задачи. Особенный интерес представляет интеллектуальное управление для достижения глобально поставленной цели анализа. При этом обобщенность рассмотренных подходов не позволяет непосредственно реализовать механизм управления анализом в ГИС.

Подводя итог, можно заключить, что известные в настоящее время подходы к управлению процессом интерактивного анализа картографических данных для принятия решений не рассматривают пару аналитик—ГИС как систему, в которой ГИС должна вести себя рациональным образом. Интеллектуальный характер интерактивного взаимодействия существенно повышает качество информационной

поддержки принятия решений. Такой подход обладает несомненным преимуществом, но остается недостаточно исследованным.

2. Задача управления процессом анализа в общем виде

Управление процессом анализа необходимо при принятии решений в трудно формализуемых проблемных ситуациях. Поиск и сравнение вариантов решений при использовании ГИС представляет собой анализ последовательности картографических изображений, которая должна сохранять смысловую стабильность. Поскольку понятие "смысл" [18, 19] многозначно, под смыслом картографического изображения будем понимать объекты, отношения и категории, которые с высокой вероятностью отражаются либо ассоциируются с элементами ментального образа ситуации в сознании аналитика. Подчеркнем, что перечисленные выше сущности могут и не входить в текущую визуализацию подмножества данных. Стабильность понимается как сохранение смысла при изменении набора отображаемых объектов, отношений и категорий.

Рассмотрим задачу, которую должна решать интеллектуальная подсистема ГИС для управления анализом (ИПУА).

Пусть $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ есть множество картографических объектов и отношений, хранящихся в информационной базе ГИС. Для решения прикладной задачи аналитик создает рабочую область $w \subset \Omega$, $|w| \ll |\Omega|$, в которую с помощью запросов через пользовательский интерфейс включает или исключает важные для анализа элементы $\omega_i \in \Omega$. Последовательность запросов $\{q_i\}_{i=0}^Q$ в процессе решения задачи порождает последовательность изображений, каждое из которых обладает определенной полезностью. Уровень полезности рабочей области оценивается функцией полезности

$$0 \leq F(w) \leq 1,$$

где $F(w) = 1$ соответствует максимально полезному, $F(w) = 0$ — совершенно бесполезному изображению. Мерой полезности, как показал анализ, следует считать уровень субъективного восприятия аналитиком изображения рабочей области, который характеризуется числом объектов рабочей области $N = |w|$.

Обозначим $C = \{c_k\}$ — множество контекстов, в каждом из которых поддерживается смысловое содержание изображений. Работа в контексте $c_m \in C$ говорит о том, что при конструировании изображений используется

ограниченное множество типов и экземпляров картографических объектов и установлены определенные правила визуализации рабочей области анализа. Описание контекста включает в себя знания экспертов, решавших задачи соответствующего класса.

Представим множество объектов рабочей области w в виде объединения двух компонентов:

$$\begin{aligned} w &= B \cup E \\ B &= \bigcup_j q_j, \quad B \subseteq \Omega, \\ B \cap E &= \emptyset, \quad E \subset \Omega, \end{aligned} \quad (1)$$

где B является множеством картографических объектов и отношений, отображенных по запросам $\{q_i\}_{i=0}^Q$. Назовем множество B скелетом. Скелетон образован сущностями, которые явно были запрошены через интерфейс пользователя. Множество E — окружение скелетона, включающее в себя сущности, влияющие на оценку ситуации пользователем. Объекты окружения автоматически добавляет ИПУА, реализуя оператор

$$E = K(B, c_m), \quad c_m \in C,$$

ставящий в соответствие множеству объектов скелетона множество объектов окружения в заданном контексте. Тогда в общем виде задачу управления анализом, которую должна реализовать ИПУА, можно описать следующим образом:

$$\begin{cases} F(w) \rightarrow \max, \\ w = B \cup E, \\ B = \bigcup_j q_j, \\ E = K(B, c_m), \\ j = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (2)$$

Задача (2) решается всякий раз в момент поступления очередного запроса от пользователя. На это указывает индекс $j = 0, 1, 2, \dots$. Таким образом, действия пользователя концентрируются на манипуляции скелетом, ИПУА формирует окружение.

Исходя из (2) работа системы аналитик—ГИС осуществляется по следующему алгоритму:

1. Аналитик регистрируется в сеансе работы с ГИС, определяя контекст предстоящего анализа.

2. Аналитик формирует запрос к картографической базе данных ГИС через пользовательский интерфейс.

3. Ядро ГИС исполняет запрос и формирует результирующее множество объектов, добавляя их к текущему скелетону.

4. Для текущего состояния скелетона ИПУА выполняет подбор объектов окружения так, чтобы добиться максимальной полезности рабочей области:

4.1. Уточняется контекст. Если результирующее множество существенно выходит за рамки контекста, определяется наиболее близкий по смыслу. Диалог продолжается в новом контексте. В противном случае сохраняется текущий контекст.

4.2. Пока уровень восприятия рабочей области неудовлетворителен, выполняется процедура изменения сложности, добавляющая или удаляющая картографические объекты.

5. ГИС визуализирует рабочую область.

6. Если сеанс не завершен, перейти к п. 2.

7. Завершить сеанс.

В приведенном алгоритме интеллектуальное управление анализом реализуется в п. 4. Главную роль здесь играет контекст, гарантирующий смысловую стабильность дальнейшего анализа. В рамках установленного контекста выполняется специальная процедура изменения сложности изображения. Рассмотрим особенности их реализации.

3. Концептуальная модель контекста

Под контекстом в области исследования контекстно зависимых систем традиционно понимают любую информацию, позволяющую идентифицировать сложившуюся ситуацию и предпринять адекватные действия для решения поставленной задачи [20]. Концептуальная и логическая структура контекста зависят от области приложения. Рассматриваемая задача требует особой концепции контекста, поскольку ставится цель стабилизации смысла процесса анализа.

Ключевым вопросом использования контекстов является выявление того из них, который в наибольшей степени соответствует смыслу текущей ситуации. Обычной практикой является использование разнообразных метрик близости. Метрики тесно связаны с концептуальной моделью самого контекста. В рассматриваемой задаче управления анализом понятие "смысл" предлагается формально отобразить описанием допустимых преобразований контекста, в рамках которых сохраняется интуитивно понимаемая суть процесса анализа. Если границы допустимых изменений нарушены, то смысл анализа в используемом контексте считается потерянным.

Представим контекст следующим образом:

$$c_m = \langle c_m^*, H(c_m) \rangle, \quad (3)$$

где c_m^* есть ядро контекста, включающее в себя фундаментальные знания об объектах и отношениях, свойственных данному контексту. На практике они отражают, например, научно обоснованный паттерн или общепринятый метод анализа проблемы. Ядро контекста включает знания о границах пространственной (L_s), временной (L_t) и семантической (L_a) области анализа.

Знания, сосредоточенные в c_m^* , необходимы, но недостаточны для сохранения смысловой стабильности анализа по следующим причинам:

1) сходство ядер не является единственным определяющим фактором для смысловой близости. Не менее важны знания о допустимых преобразованиях информационных компонентов контекста, которые не меняют смысл контекста. Подобные преобразования всегда ограничены интуитивными представлениями эксперта о сути анализа;

2) ядра контекстов не отражают имеющиеся у экспертов-аналитиков глубинные знания о переносе имеющегося опыта анализа на другие ситуации. В отличие от поверхностных, эти знания оперируют "разумными" (допустимыми) различиями ситуаций и объектов. Это позволяет экспертам принимать достоверные решения в новых, ранее не изученных условиях. Для задачи управления анализом отсутствие информации указанного содержания часто приводит к некорректному переносу опыта.

В целях повышения достоверности сравнения смысла контекстов в выражении (3) введен набор $H(c_m)$ допустимых преобразований границ области анализа, сохраняющих суть контекста c_m . В $H(c_m)$ входят объекты, отношения и функции, наличие (или отсутствие) которых в рабочей области анализа свидетельствует о сохранении контекстом его смысла.

Вопрос о том, насколько адекватно $H(c_m)$ отражают смысл контекста, решается организацией процедуры получения экспертного знания. Отметим, что допустимые преобразования не требуют аналитического описания, а представляют собой визуализируемые картографические объекты. Аналитик, таким образом, получает возможность в привычном интерфейсе пользователя ГИС передавать знания в образной форме.

4. Построение максимально полезной для анализа рабочей области

В задаче (2) функция полезности зависит от числа картографических элементов рабочей области $w \subset \Omega$. Максимально полезная

для анализа рабочая область должна включать в себя число элементов

$$N_{opt} = \arg \max(F(N)).$$

Зависимость восприятия от числа картографических элементов субъективна, однако на практике для каждого пользователя системы можно указать среднее число объектов N^* , которое позволяет ему комфортно воспринимать картографическое изображение рабочей области. Значение N^* не требует высокой точности для своего задания, поскольку по известному эмпирическому закону [21] изменение интенсивности восприятия логарифмически зависит от числа картографических элементов. То, что в соответствии с приведенными рассуждениями

$$N^* = \arg \max(F(N)),$$

не означает, что максимально полезная рабочая область строится простым удалением или добавлением объектов. Особенность картографических изображений состоит в том, что удаление или добавление заданного числа произвольно выбранных объектов может привести к смысловым искажениям. Из-за этого практически никогда не существует экземпляра рабочей области с $N_{opt} = N^*$. Поэтому необходимо реализовать алгоритм поиска решения, представляющего собой осмысленный соответствующий контексту вариант рабочей области с близким к N^* числом элементов.

Ядро контекста включает в себя компонент, необходимый для решения задачи (2) — описание важности объектов и отношений для проведения анализа. Данное отношение предпочтения позволяет программно отсортировать объекты рабочей области в порядке увеличения значимости. Эта информация используется программной процедурой изменения сложности **ChangeComplexity (WorkSpace, Context, Mode)**. Входными параметрами процедуры является множество объектов и отношений текущей рабочей области (**WorkSpace**), контекст (**Context**) и числовой показатель изменения сложности (**Mode**). Его положительное значение предполагает увеличение числа объектов рабочей области, отрицательное — уменьшение. Данная функция удаляет или добавляет объекты, сохраняя смысловое содержание изображения.

Поскольку функция полезности $F(N)$ является унимодальной с максимумом в точке N^* , для нахождения наилучшего приближения к нему достаточно найти и сравнить ее значения в ближайшей левой ($N_l < N^*$) и правой ($N_r < N^*$) точках. Алгоритм поиска имеет следующий вид:

1. Для текущего запроса q_i модифицировать скелетон B и сформировать его окружение $E = K(B, c_m)$. Вычислить $N_{new} = |B \cup E|$.
2. Если $N_{new} = N^*$, то перейти к п. 3, иначе
 - 2.1. Вычислить $\Delta N_1 = N_{new} - N^*$
 - 2.2. Изменить сложность рабочей области вызовом функции $N_1 = \text{ChangeComplexity}(w, c_k, \Delta N_1)$
 - 2.3. Вычислить $\Delta N_2 = N_1 - N^*$
 - 2.4. Изменить сложность рабочей области вызовом функции $N_2 = \text{ChangeComplexity}(w, c_k, \Delta N_2)$.
 - 2.5. Выбрать вариант, соответствующий $\max(F(N_1), F(N_2))$, считать его максимально полезным экземпляром рабочей области.
3. Визуализировать рабочую область.

5. Экспериментальное исследование ИПУА

Целью экспериментального исследования ИПУА была оценка границ эффективно-го применения метода управления анализом картографических изображений. Эксперимент проводился в корпоративной ГИС, информационная база которой занимает объем около 2,3 Тбайт и включает описание приблизительно 10^6 объектов. Система предоставляет геосервис для решения следующих групп прикладных задач:

- 1) учет и обслуживание технологического оборудования;
- 2) строительство и ремонт зданий и сооружений;
- 3) управление инженерными коммуникациями;
- 4) транспортная логистика на территории предприятия и на прилегающей территории;
- 5) управление энергоснабжением;
- 6) обеспечение наблюдения и территориальной безопасности;
- 7) реагирование на аварийные ситуации;
- 8) проектирование транспортной сети;
- 9) управление недвижимостью;
- 10) размещение и транспортировка опасных отходов производства.

Практически важными для пользователей геосервиса оказались следующие показатели качества: возможность сформулировать прикладную проблему и обозначить направление поиска решения (обозначим этот показатель A_1); возможность найти решение проблемы в условиях высокого риска (A_2); возможность находить удовлетворительные решения при жестких ограничениях на время его поиска (A_3); возможность снизить когнитивную нагрузку, вызванную необходимостью выполнения операций, не связанных напрямую с решением проблемы

(A_4). Перечисленные показатели используются как независимо, так и в комбинации. Поскольку в любом сочетании показателей один из них выступает как критерий, а остальные — как ограничения, экспериментальная оценка качества сервиса проводилась по каждому показателю $A_1 - A_4$ по отдельности. Оценка проводилась опросом пользователей-аналитиков. Предлагалось использовать 10-бальную шкалу оценки удовлетворенности, где 0 соответствует отсутствию влияния на процесс анализа, 5 — максимальному уровню полезности использования сервиса, (–5) — максимально отрицательному влиянию сервиса. Под отрицательным влиянием понималось появление данных, явно противоречащих логике анализа и затрудняющих его дальнейший ход.

Опрос проводился среди 23 аналитиков, использовавших геосервис с управлением анализом в течение одного месяца. В системе было описано 27 контекстов, которые могли использоваться при решении задач перечисленных выше групп. Примером может быть контекст "Склады", отображающий не только пространственное положение складских зданий и помещений, но и прилегающие транспортные, энергетические коммуникации, точки видеонаблюдения и средства аварийной защиты. При имеющемся числе контекстов вычисление по формуле (4) дали значение $Q^* = 4$, т.е. при явном выборе контекста пользователю из 27 возможных значений предлагается для выбора не более 4 вариантов перехода.

В таблице приведены результаты опроса пользователей сервиса. Столбцы соответствуют пронумерованным выше группам задач, строки — критериям $A_1 - A_4$.

На рис. 1–4 показаны диаграммы распределения оценок по отдельным показателям. Анализ диаграмм позволил сделать ряд выводов.

Наименьший эффект по показателю A_1 (рис. 1) получен при анализе аварийных ситуаций. Этот результат можно объяснить необходимостью для аналитиков следовать регламентированным процедурам, которые охватывают реально возникающие ситуации. По

Результаты опроса пользователей сервиса

Критерий	Номер группы задач									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A1	2	3	4	4	2	3	0	1	1	3
A2	4	3	4	5	1	3	4	3	0	5
A3	4	4	4	4	5	3	4	5	4	5
A4	3	1	4	4	–1	3	4	1	0	2

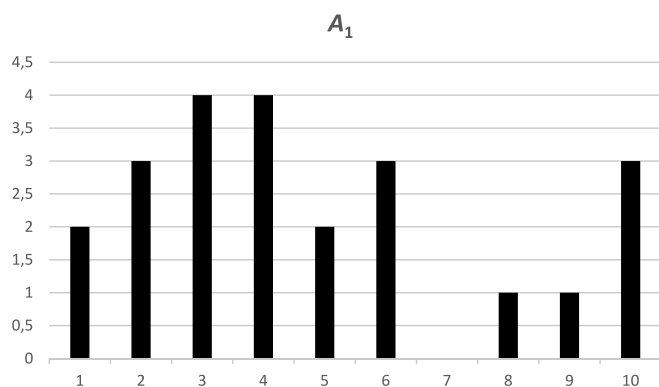


Рис. 1. Удовлетворенность сервисом при формулировке постановки задачи (A_1)

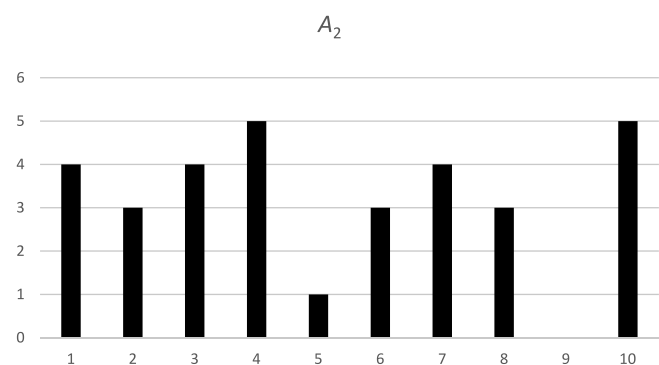


Рис. 2. Удовлетворенность сервисом для нахождения решения в условиях высокого риска (A_2)

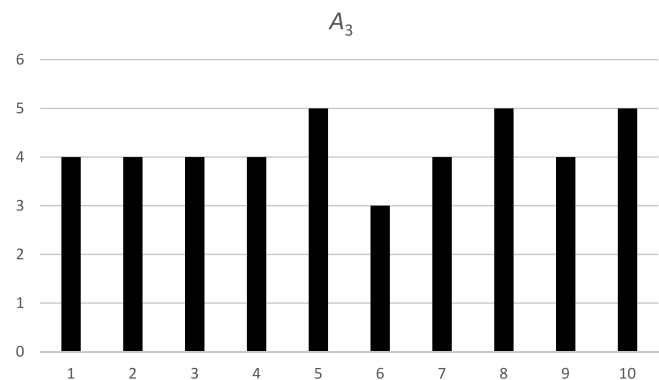


Рис. 3. Удовлетворенность сервисом при строгих ограничениях на время поиска решения (A_3)

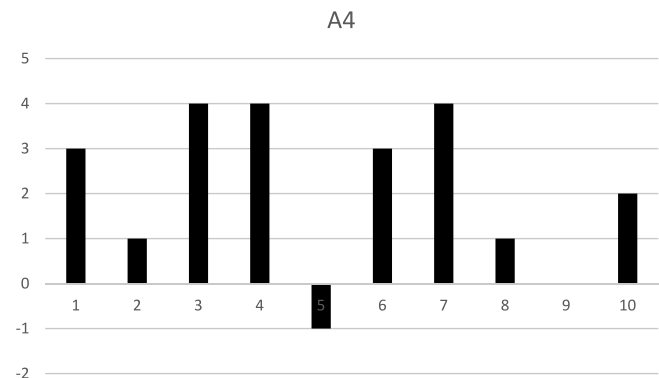


Рис. 4. Удовлетворенность сервисом относительно снижения когнитивной нагрузки (A_4)

существо, аварийные ситуации легко классифицировались. Об этом свидетельствует практическое отсутствие смены контекстов. Гораздо больший эффект по показателю A_1 наблюдался при решении задач, предусматривающих изучение территории. Например, при решении групп задач 3 сменялось в среднем пять контекстов. Можно предположить, что причиной являлась неопределенность исходных данных.

Как показывает диаграмма на рис. 2, эффект привлечения геосервиса для принятия ответственных решений (показатель A_2) оказался в среднем достаточно высоким.

Возможной причиной отклонения по группе задач 5 может объясняться невысокая значимость факторов пространственного размещения источников и потребителей энергии для принятия соответствующих решений.

Эффект по показателю A_3 , как видно из диаграммы на рис. 3, достаточно высок по всем группам задач, что может объясняться снижением избыточности картографических изображений и стабилизации их сложности в области наилучшего уровня восприятия.

Что касается снижения уровня когнитивной нагрузки (рис. 4), то замечен значительный разброс оценок. Например, для группы задач 5 удовлетворенность данным фактором отрицательна, т.е. возникали изображения, вызывающие у аналитиков дискомфорт. Возможной причиной появления подобной ситуации представляется отсутствие в предлагаемых аналитику контекстах необходимого смыслового наполнения.

Заключение

В данной работе предложен и исследован метод управления процессом интерактивного анализа картографических изображений, основанный на максимизации их полезности. Полезность обеспечивается отбором картографических объектов и отношений для визуализации в установленном контексте при ограничении на уровень восприятия изображений человеком-аналитиком. Решения, принимаемые в этом случае, имеют более высокое качество, что подтверждено результатами эксперимента.

Отличительной особенностью управления анализом является контроль его смысловой направленности. С этой целью предложено представлять контекст двумя компонентами — ядром и набором допустимых преобразований ядра, сохраняющих его смысл. Сопоставление интерактивных запросов аналитика с допустимыми преобразованиями позволяет не только обна-

руживать изменение смысла анализа, но и подбирать близкие по смыслу контексты. Динамическую смену контекстов можно рассматривать как специальный прием компенсации неопределенности относительно конечной цели анализа, которую поставил перед собой аналитик.

Экспериментальный анализ реализации предложенного метода управления показал, что наибольший положительный эффект наблюдается при решении трудно формализуемых прикладных задач в жестких временных рамках.

Список литературы

1. Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J., Rhind D. W. Geographic Information Systems and Sciences. Wiley, 2011. 560 p.
2. Shashi S., Hui X. Encyclopedia of GIS. New York: Springer Science + Business Media, LLC, 2008. 2507 p.
3. URL: <https://www.autodesk.com/products/autocad/included-toolsets> (дата обращения: 25.03.20).
4. URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview> (дата обращения: 25.03.20).
5. Hick W. E. On the rate of gain of information // Quarterly Journal of Experimental Psychology. 1952. Vol. 4, N. 1. P. 11–26.
6. Gibson J. J. A Theory of Direct Visual Perception. J. Royce, W. Rozenboom (eds.). The Psychology of Knowing. NY: Gordon & Breach, 1972. 166 p.
7. Palmiero M., Nori R., Piccardi L. Visualizer cognitive style enhances visual creativity // Neuroscience Letters. 2016. N. 615. P. 98–101.
8. Colman A. M. A Dictionary of Psychology, (3 ed.). Oxford University Press, 2008. 560 p.
9. Jakob's Law of Internet User Experience. URL: <https://www.nngroup.com/videos/jakobs-law-internet-ux/> (дата обращения: 25.03.20).

10. Cybulski J. L., Keller S., Nguyen L., Saundage D. Creative problem solving in digital space using visual analytics // Computers in Human Behavior. 2015. Vol. 42. P. 20–35.
11. Endsley M. R. Design and evaluation for situation awareness enhancement // Proceedings of the human factors society 32nd annual meeting. 1988. P. 97–101.
12. Endsley M. R., Jones D. J. Designing for situation awareness: An approach to human-centered design. London: Taylor & Francis, 2004. 396 p.
13. Ziemke T., Schaefer K. E., Endsley M. R. Situation awareness in human-machine interactive systems // Cognitive Systems Research. 2017. N. 46. P. 1–2.
14. Nilsson M., van Laere J., Susi T., Ziemke T. Information fusion in practice: A distributed cognition perspective on the active role of users // Information Fusion. 2012. Vol. 13, N. 1. P. 60–78.
15. Turner A. Introduction to neogeography. Sebastopol. CA: O'Reilly, 2006. 212 p.
16. Taylor D. F., Lauriault T. P. Conclusion and the Future of Cybercartography // Developments in the Theory and Practice of Cybercartography, Applications and Indigenous Mapping. 2014. Vol. 5. P. 343–350.
17. Collins C., Andrienko N., Schreck T., Yang J., Choo J., Engelke U., Jena A., Dwyer T. Guidance in the human-machine analytics process // Visual Informatics. 2018. Vol. 2, N. 3. P. 166–180.
18. Чудова Н. В. Концептуальное описание картины мира для задачи моделирования поведения, основанного на сознании // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 2. С. 51–62.
19. Кузнецов О. П. Когнитивная семантика и искусственный интеллект // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 4. С. 32–42.
20. Dey A., Abowd G. Towards a better understanding of context and context-awareness // CHI 2000 Workshop on the What, Who, Where, When, and How of Context-Awareness. 2000. P. 304–307.
21. Mackay D. M. Psychophysics of perceived intensity: A theoretical basis for Fechner's and Stevens' laws // Science. 1963. N. 139. P. 1213–1216.

S. L. Belyakov, Doctor of Tech. Sc., Professor, e-mail: beliacov@yandex.ru,
A. V. Bozhenyuk, Doctor of Tech. Sc., Professor, e-mail: avb002@yandex.ru,
S. A. Zubkov, Senior Researcher, e-mail: szubkov@sfedu.ru,
South Federal University, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation

The Method of Intelligent Control of the Process of Interactive Study of Spatial Data for Decision Making

The paper considers the task of organizing a rational interaction between a geographic information service (GIS) and a user who analyzes spatial data. The purpose of the analysis is to develop a solution to an applied problem in conditions of incompleteness and uncertainty of information about both the final goal and the solution procedure. The work considers an interactive visual analysis of a space region, where the GIS delivers data from cartographic sources and the user compiles and analyzes the cartographic representation of the workspace in real-time. The task of guiding the analysis process to maintain its intelligent orientation is formulated. The meaning of the analysis process is associated with achieving situation awareness of the user, which will ensure the adoption of higher quality decisions. A control method based on the selection of an adequate context from the set of contexts described in the GIS has proposed. A two-component context model has proposed in the form of a kernel and a set of valid kernel transformations preserving the meaning of the context. The intelligent orientation of the analysis has stabilized using the proposed presentation. The problem of determining the optimal number of GIS contexts has considered which minimizes the complexity of the analysis and relation has obtained for its calculation. The problem of maximizing the utility of cartographic images generated by GIS at the user's request has formulated. A representation of the analysis workspace by skeleton and environment has proposed, which has used to ensure maximum utility. The results of an experimental study of the layout of an intelligent system for managing the analysis are presented too.

Keywords: decision making, visual analysis, intelligent management, geoinformation service

Acknowledgements: The reported study was funded by RFBR according to the research project № 19-07-00074 and № 20-01-00197.

DOI: 10.17587/it.26.394-402

References

1. Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J., Rhind D. W. Geographic Information Systems and Sciences, 3rd ed., Wiley, 2011.
2. Shashi S., Hui X. Encyclopedia of GIS, New York, SpringerScience + Buisness Media, LLC, 2008.
3. Available at: <https://www.autodesk.com/products/autocad/included-toolsets> (date of access: 25.03.2020).
4. Available at: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview> (date of access: 25.03.2020).
5. Hick W. E. On the rate of gain of information, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1952, vol. 4, no. 1, pp. 11–26.
6. Gibson J. J. A Theory of Direct Visual Perception, J. Royce, W. Rozenboom (eds.), *The Psychology of Knowin*, NY, Gordon & Breach, 1972.
7. Palmiero M., Nori R., Piccardi L. Visualizer cognitive style enhances visual creativity, *Neuroscience Letters*, 2016, no. 615, pp. 98–101.
8. Colman A. M. A Dictionary of Psychology, (3 ed.), Oxford University Press, 2008.
9. Jakob's Law of Internet User Experience, Available at: <https://www.nngroup.com/videos/jakobs-law-internet-ux/> (date of access: 25.03.2020).
10. Cybulski J. L., Keller S., Nguyen L., Saundage D. Creative problem solving in digital space using visual analytics, *Computers in Human Behavior*, 2015, vol. 42, pp. 20–35.
11. Endsley M. R. Design and evaluation for situation awareness enhancement, *Proceedings of the human factors society 32nd annual meeting*, 1988, pp. 97–101.
12. Endsley M. R., Jones D. J. Designing for situation awareness: An approach to human-centered design, London, Taylor & Francis, 2004.
13. Ziemke T., Schaefer K. E., Endsley M. R. Situation awareness in human-machine interactive systems, *Cognitive Systems Research*, 2017, no. 46, pp. 1–2.
14. Nilsson M., van Laere J., Susi T., Ziemke T. Information fusion in practice: A distributed cognition perspective on the active role of users, *Information Fusion*, 2012, vol. 13, no. 1, pp. 60–78.
15. Turner A. Introduction to neogeography. Sebastopol, CA, O'Reilly, 2006.
16. Taylor D. F., Lauriault T. P. Conclusion and the Future of Cybercartography, *Developments in the Theory and Practice of Cybercartography, Applications and Indigenous Mapping*, 2014, vol. 5, pp. 343–350.
17. Collins C., Andrienko N., Schreck T., Yang J., Choo J., Engelke U., Jena A., Dwyer T. Guidance in the Human–Machine Analytics Process, *Visual Informatics*, 2018, vol. 2, no. 3, pp. 166–180.
18. Chudova N. V. Model of the world conceptualizing for the purpose of deliberate behavior simulation, *Iskusstvennyi Intellekt i Prinyatie Reshenii*, 2012, no. 2, pp. 51–62 (in Russian).
19. Kuznetsov O. P. Cognitive semantics and artificial intelligence, *Iskusstvennyi Intellekt i Prinyatie Reshenii*, 2012, no. 4, pp. 32–42 (in Russian).
20. Dey A., Abowd G. Towards a better understanding of context and context-awareness, *CHI 2000 Workshop on the What, Who, Where, When, and How of Context-Awareness*, 2000, pp. 304–307.
21. Mackay D. M. Psychophysics of perceived intensity: A theoretical basis for Fechner's and Stevens' laws, *Science*, 1963, no. 139, pp. 1213–1216.

УДК 004: 007.51

DOI: 10.17587/it.26.402-409

В. А. Гостюнина, аспирант, e-mail: lerusya93@list.ru,
Н. А. Давидюк, канд. техн. наук, доц., e-mail: davidyuknv@bk.ru,
Астраханский государственный технический университет

Разработка и исследование комбинированного метода классификации текстовой информации по деструктивным индикаторам

Рассматривается задача идентификации деструктивной информации, которая сводится к задаче классификации анализируемой текстовой информации по признаку наличия или отсутствия деструктивных индикаторов. Описан универсальный комбинированный метод классификации текстовой информации по деструктивным индикаторам. Предложенный метод состоит из трех этапов: нормализация данных, модифицированный поиск по словарю и байесовский классификатор. Проведена оценка эффективности работы описанного комбинированного метода.

Ключевые слова: Интернет, деструктивный контент, деструктивный индикатор, классификация текстовой информации, комбинированный метод, нормализация данных, автоматизированный поиск, байесовский классификатор, машинное обучение

Введение

Прогресс науки и техники в настоящее время сопровождается интенсивным внедрением во многие сферы человеческой деятельности новых информационных технологий. Развитие сети Интернет приводит к неконтролируемому росту количества различной информации, в том числе

представленной в текстовом виде. Среди полезных данных в сети Интернет существует значительный объем деструктивного контента [1].

Результат анализа действующих нормативно-правовых актов РФ показал отсутствие четкого определения деструктивной информации и эталонного списка деструктивного контента. Соответственно, имеются вопросы, связанные

с определением перечня деструктивной информации, в отношении которой устанавливается соответствующий правовой режим ее оборота [2, 3].

В рамках работы под деструктивным контентом (от лат. *destructio* — разрушение, нарушение нормальной структуры) понимаем информацию, которая оказывает разрушающее воздействие на психику отдельного индивидуума, группы лиц или общественное сознание, а также представляет угрозу конституционным правам и свободам человека и гражданина в области духовной жизни и нравственного здоровья.

Для создания такого списка необходимо ввести еще одно понятие — "деструктивный индикатор", т.е. критерий наличия в информации деструктивной направленности, с помощью которого можно отнести информацию к конкретному классу, а также проверить необходимость цензуры информации. В статье [4] приведен агрегированный перечень основных выделенных деструктивных индикаторов на основе анализа законодательства Российской Федерации.

Автоматизированный поиск и идентификация деструктивного контента являются крайне не актуальными направлениями обеспечения информационной безопасности из-за внедрения "суверенного Рунета" и активизации распространения информационных вбросов различными нелегальными сообществами [1, 5].

По сути, поиск и идентификация деструктивного контента сводятся к задаче классификации информации по признакам наличия либо отсутствия в ней деструктивных индикаторов, таких как насилие и жестокость, антиобщественные, противоправные действия или преступления, ненормативная лексика и др. [2, 3]. Задача усложняется тем, что не все множество индикаторов может быть идентифицировано без участия экспертов, однако потребность в минимизации их участия очевидна [6].

Таким образом, разнородный характер контента и использование различных оснований классификации приводят к необходимости разработки унифицированного метода, позволяющего эффективно классифицировать входящую текстовую информацию на основе анализа наличия/отсутствия деструктивных индикаторов.

Комбинированный метод классификации текстовой информации

Для решения задачи предлагается комбинированный метод классификации текстовой информации для обнаружения деструктивных индикаторов, разработанный с учетом резуль-



Рис. 1. Этапы комбинированного трехэтапного метода классификации текстовой информации

татов анализа применимости существующих поисковых методов к решению задачи [7, 8].

Сущность разработанного метода состоит в обработке входных данных тремя модулями (рис. 1).

Предложенный метод позволяет провести поэтапный анализ текста, а затем и классификацию по одному или нескольким деструктивным индикаторам, причем 2-й и 3-й этапы метода могут применяться в комбинации или отдельно, если это требуется.

1-й этап осуществляет предварительную подготовку входных данных. При загрузке исследуемого контента проверяемый текст часто представлен в неструктурированном виде, а также не все слова могут "нести" искомую семантику. Поэтому проводится предобработка текста.

2-й этап предназначен для первоначального анализа текста на содержание деструктивных индикаторов по словарю. Часто в этих целях применяется посимвольный перебор по словарному набору для нахождения точного совпадения. Для решения задачи классификации текстов для обнаружения деструктивных индикаторов применение тематического поиска в "чистом" виде нецелесообразно [11]. В связи с этим предлагается модифицированный поиск по словарю.

По результатам 2-го этапа в случае нахождения хотя бы одного слова из словаря или его модификации (с определенной вероятностью) дальнейший процесс обработки завершится, и текст классифицируется как деструктивный. В противном случае анализ текста продолжается на 3-м этапе, базирующемся на методах машинного обучения.

Трехэтапный комбинированный метод позволяет классифицировать тексты в зависимости от конкретной задачи как по точному совпадению найденных слов с заданными деструктивными индикаторами, так и по определенной вероятности совпадения одного или нескольких индикаторов в совокупности. Рассмотрим подробнее 2-й и 3-й этапы метода.

Нормализация данных. Машинный анализ любой неструктурированной информации требует предварительной ее обработки. Основной трудностью анализа текстов является большое число слов в проверяемом тексте, так как далеко не все слова могут "нести" искомую семантику. Проблема значительно усугубится, если входной поток информации не "унифицирован", возникнет временная избыточность работы алгоритма и некорректные результаты. На рис. 2 представлена пошаговая подготовка входных данных к анализу на содержание деструктивной информации.

В проведении предобработки текста используются следующие виды алгоритмов стемминга [9, 10]:

- алгоритмы поиска (полный перебор основы слова по списку);
- усечение окончаний (имеется небольшой список правил, по которым происходит нахождение основы слова);
- лемматизация (приведение слова к канонической или первоначальной словарной форме — лемме);
- стохастические алгоритмы (вероятностное определение корневой формы слова);
- статические алгоритмы (анализ N -грамм, алгоритмы сопоставления).

Модифицированный поиск по словарю. После прохождения этапа нормализации текст готов к непосредственно анализу на содержание деструктивных индикаторов (рис. 3).

Предлагаемый модифицированный поисковый метод основывается на вычислении отношения числа символов анализируемого слова, соот-

ветствующих символам слова из словаря, к общему числу символов в слове и отнесении на этой основе текста к деструктивным/недеструктивным [12]. Для этого необходимо определить вероятность принадлежности рассматриваемого слова к деструктивному классу. Механизм расчета вероятности представляет следующий алгоритм.

Рассмотрим часть текста X , состоящую из определенного набора слов $\{X_1, \dots, X_i, \dots, X_n\}$, $i = 1, \dots, n$, где n — число слов в тексте; каждое слово текста X_i имеет конечное число символов: $X_i = \{X_1^i, \dots, X_q^i, \dots, X_m^i\}$, $q = 1, \dots, m$, m — число букв в слове. Векторное представление слов из словаря имеет вид $C = \{C_1, \dots, C_j, \dots, C_k\}$, $j = 1, \dots, k$, где k — число деструктивных слов в словаре; каждое деструктивное слово C_j из словаря имеет конечное число символов $C_j = \{C_1^j, \dots, C_w^j, \dots, C_t^j\}$, $w = 1, \dots, t$, t — число букв в деструктивном слове.

Шаг 1. Осуществим последовательное сравнение букв деструктивного слова C_j с буквами анализируемого слова X_i . Для повышения точности отнесения слова к деструктивному не допускается при посимвольном сравнении двух слов превышение длины анализируемого слова над длиной деструктивного.

Если буквы совпадают, то "счетчик" результата сравнения R_j^i увеличивается на 1. Значение R_j^i , равное сумме совпадений для всех букв слова X_i , принадлежит $[0, m]$. Можно ввести величину P_j^i , которая вычисляется следующим образом:

$$P_j^i = \begin{cases} \frac{R_j^i}{m}, & \text{если } m \leq t; \\ \frac{R_j^i}{t}, & \text{в иных случаях,} \end{cases}$$

$$i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, k,$$

где R_j^i — значение, заданное алгоритмом своего вычисления, описанного выше.

Установим интервал $P_{\text{п}}$, на основе принадлежности к которому устанавливается факт наличия деструктивной информации в тексте. Примем значение для этого показателя, установленное эмпирическим путем, равным $[0,5; 1]$.

Шаг 2. Определим показатель P отнесения текста X к деструктивным равным максимальному значению из множества полученных оценок для всех слов, входящих в него:

$$P = \max\{P_j^i\}, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, k.$$

Шаг 3. Сравним найденный показатель P и пороговое значение $P_{\text{п}}$ и классифицируем текст как деструктивный или недеструктивный. Такой способ классификации применим

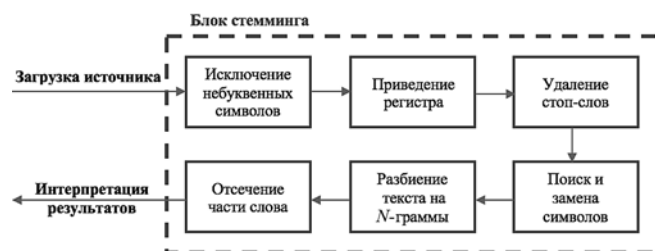


Рис. 2. Подготовка входных данных к анализу на содержание деструктивной информации



Рис. 3. Контекстная диаграмма работы модифицированного поиска по словарю

при "строгом" отборе, когда обнаружение хотя бы одного деструктивного слова в тексте X является достаточным условием отнесения текста к деструктивному классу.

Шаг 4. После установления порогового значения выделим деструктивные слова в множество D : $X_i \in D$, если $P_j^i \in P_p$. Данное множество выявленных деструктивных слов в анализируемом тексте X может представлять самостоятельный интерес для исследования. Например, когда обнаружение хотя бы одного деструктивного слова в тексте X является недостаточным условием деструктивности, то показатель отнесения текста X к деструктивному классу предлагается вычислить на основе отношения числа выявленных деструктивных слов $X_i \in D$ к числу уникальных слов исходного текста X .

Необходимо обратить внимание на возможность пополнения словаря новыми деструктивными словами. Найденное слово в тексте, относящееся к классу деструктивных, является новым в том случае, если значение его показателя отнесения к заданному классу принадлежит интервалу P_c , который найден эмпирическим способом и необходим для отсека слов, отличающихся от существующих словарных слов только падежным окончанием или множественным числом. Данный интервал принимается равным $[0,5; 0,75]$.

Шаг 5. Определим принадлежность найденного деструктивного слова словарю деструктивных индикаторов:

$$\begin{cases} X_i \in C, \text{ если } P_j^i \in P_c; \\ X_i \notin C, \text{ в иных случаях.} \end{cases}$$

Шаг 6. При $P_j^i \in P_c$ добавим новое слово в словарь деструктивных индикаторов на основе расчетов вероятностей отнесения слов к деструктивным.

По результатам работы модифицированного поиска по словарю анализируемому тексту присваивается класс "деструктивный" или "недеструктивный", а также, в случае необходимости, обновляется словарь деструктивных индикаторов. Если текст классифицирован как деструктивный, то итоговый результат в виде присвоенного класса к анализируемой текстовой информации считается достигнутым. В противном случае текстовая информация передается для дальнейшего анализа на следующем этапе "Байесовский классификатор".

Байесовский классификатор. Суть работы байесовского классификатора заключается в автоматическом определении наличия деструктивных индикаторов в тексте на основе обучающей выборки (рис. 4) [13, 14]. Поэтому



Рис. 4. Контекстная диаграмма работы байесовского классификатора

метод сводится к определению наиболее вероятного класса (к которому принадлежит анализируемый текст) при использовании оценки апостериорного максимума. Для этого необходимо вычислить вероятности классов и осуществить выбор класса, который обладает максимальным значением вероятности.

Обучающая выборка. Перед началом работы байесовского классификатора необходимо провести его обучение на выборке, состоящей из деструктивных и недеструктивных текстов, которые являются эталонными по заданной задаче.

Во время обучения байесовского классификатора происходит пополнение двух словарей деструктивными и недеструктивными индикаторами. Каждому слову из словаря присваивается переменное значение, которое является частотой встречаемости его в анализируемых ранее текстах соответствующего класса. Эти переменные при пополнении определенного словаря увеличиваются на значение, которое являлось частотой встречаемости в текущем тексте. Благодаря этой функции Байесовский классификатор является самообучающимся [13, 14].

Процесс обучения классификатора позволяет также вычислить показатель отнесения анализируемого текста к деструктивному/недеструктивному классам. Для этого необходимо ввести учет общего числа проанализированных текстов, что является суммой числа текстов из обучающей выборки, и числа текстов, которые отнесены к определенному классу. Значения также корректируются после окончания анализа каждого нового текста.

Таким образом, обучающая выборка постоянно пополняется и делает байесовский классификатор более точным в анализе поступающих текстов. Во время пополнения обучающей выборки эксперт может проверять правильность работы байесовского классификатора. Корректировать классификатор во время обучения эксперт может на основе анализа новых эталонных текстов.

Алгоритм обработки информации при решении задачи байесовским классификатором следующий.

Вернемся к рассмотрению части текста X , состоящей из определенного набора слов $\{X_1, \dots, X_j, \dots, X_n\}$, $i = 1, \dots, n$, где n — число слов в тексте. Запишем векторное представление слов из словарей с деструктивными и недеструктивными индикаторами:

$$Q = \{Q_1, \dots, Q_p, \dots, Q_q\}, \quad p = 1, \dots, q, \quad (1)$$

где q — число слов в словаре с деструктивными индикаторами;

$$W = \{W_1, \dots, W_t, \dots, W_w\}, \quad t = 1, \dots, w, \quad (2)$$

где w — число слов в словаре с недеструктивными индикаторами.

Шаг 1. При $X_i \in Q$ или $X_i \in W$ определим показатель отнесения слова X_i к деструктивному/недеструктивному классам K_j по формуле

$$P(X_i|K_j) = \frac{X_{iK_j}}{\sum X_{K_j}}, \quad j = 1, 2,$$

где X_{iK_j} — переменная, характеризующая частоту встречаемости X_i слова в текстах класса K_j ;

$\sum X_{K_j}$ — переменная, характеризующая общее число слов, находящихся в текстах класса K_j ;

j — идентификатор класса, в частности, 1 — деструктивный класс, 2 — недеструктивный класс.

Шаг 2. При $X_i \notin Q$ применим сглаживание Лапласа, предполагающее искусственное добавление единицы к частоте появления каждого слова:

$$P(X_i|K_j) = \frac{X_{iK_j} + 1}{\sum X_{K_j} + V}, \quad j = 1, 2,$$

где V — переменная, характеризующая число уникальных слов в обучающей выборке.

Шаг 3. Вычислим показатель отнесения анализируемого текста X к деструктивному/недеструктивному классам с помощью переменных, которые получены в результате работы метода Байеса на обучающей выборке:

$$P(K_j) = \frac{T_{K_j}}{T}, \quad j = 1, 2,$$

где T_{K_j} — переменная, характеризующая число текстов, относящиеся в классу K_j ; T — переменная, характеризующая общее число текстов в обучающей выборке.

Шаг 4. Вычислим конечные показатели по следующей формуле:

$$K^* = \arg \max_j \left[P(K_j) \prod_i P(X_i|K_j) \right],$$

$$i = 1, \dots, m, \quad j = 1, 2,$$

где m — число слов в текстах класса K_j ; j — идентификатор класса, в частности, 1 — деструктивный класс, 2 — недеструктивный класс.

Таким образом, анализируемый текст X отнесется к тому классу K_j , показатель K^* которого максимален.

При получении результата работы байесовского классификатора переменные обучающей выборки обновляются, а также пополняются словари деструктивного/недеструктивного классов.

В итоге анализируемый текст относится к деструктивному/недеструктивному классу без обязательного постоянного присутствия и участия эксперта, что позволяет увеличить точность и скорость анализа объемных текстов.

Оценка эффективности комбинированного метода

Необходимо оценить эффективность приведенного комбинированного метода классификации текстовой информации по деструктивным индикаторам. В ходе эксперимента требуется для каждого текста из тестовой выборки доказать или опровергнуть основную гипотезу H_0 о том, что текст является деструктивным. Кроме основной гипотезы для оценки эффективности необходимо ввести альтернативную гипотезу H_1 о том, что текст является не деструктивным.

В результате проверки текста могут быть следующие ситуации [15, 16]:

- TruePositive — ситуация, когда нулевая гипотеза принимается верно, т. е. в тексте обнаруживаются деструктивные индикаторы, которые присутствуют.
- TrueNegative — ситуация, когда нулевая гипотеза верно отклоняется, т. е. в тексте не обнаруживаются деструктивные индикаторы, которых нет.

Однако при проверке нулевой гипотезы можно допустить ошибки I или II рода.

Ошибкой I рода (FalsePositive) называют ситуацию, когда нулевая гипотеза принимается ошибочно, т. е. в тексте обнаруживаются деструктивные индикаторы, которых нет ("ложная тревога").

Ошибкой II рода (FalseNegative) называют обратную ситуацию, когда нулевая гипотеза ошибочно отвергается, т. е. в тексте не обнаруживаются деструктивные индикаторы, которые присутствуют ("пропуск цели").

Для проверки эффективности комбинированного метода отобрано 100 текстов:

Результаты проверки текстов

Методы	TruePositive (TP)	FalsePositive (FP)	FalseNegative (FN)	TrueNegative (TN)	TP + FP	FN + TN
Поиск по словарю	1	11	0	88	12	88
Модифицированный поиск по словарю	2	10	0	88	12	88
Нейронная сеть	8	4	5	83	12	88
Байесовский классификатор	9	3	4	84	12	88
Комбинированный метод	10	2	4	84	12	88

- 12 текстов деструктивной направленности (класс 1);
- 88 текстов недеструктивной направленности (класс 0).

В качестве методов для сравнения с предлагаемым комбинированным выбраны следующие:

- поиск по словарю. В основе этого алгоритма содержится заранее подготовленный словарь деструктивных терминов. Словарь является статичным на протяжении всего эксперимента;
- модифицированный поиск по словарю. В основе этого алгоритма содержится словарь деструктивных терминов, который строится по специальному алгоритму [8]. Словарь пополняется динамически после каждого нового прогона текста;
- алгоритм на базе нейронной сети. Алгоритм, который построен на базе обучающей выборки из 90 текстов (10 деструктивных, 80 недеструктивных) с использованием NeuralNetworkWizard 1.7;
- алгоритм на базе байесовского классификатора. Алгоритм работает по принципу из работы [14].

В результате проведенного эксперимента получены результаты, которые приведены в табл. 1.

Для проверки полученных значений должны выполняться равенства:

$TP + FP = D$ — число деструктивных текстов,

$FN + TN = N$ — число недеструктивных текстов.

Как видно из табл. 1, равенства для всех методов выполняются.

Определение уровня значимости и мощности. Уровнем значимости α называется вероятность совершения ошибки I рода. Значение уровня значимости α обычно задается близким к нулю, поскольку чем меньше значение уровня значимости, тем меньше вероятность совершения ошибки I рода [15].

Вероятность ошибки II-го рода обозначается β . Однако с этой величиной тесно связана другая, имеющая большое статистическое значение — мощность критерия. Она вычисляется

по формуле $(1 - \beta)$. Таким образом, чем выше мощность, тем меньше вероятность совершить ошибку II рода.

В табл. 2 приведены отношения уровня значимости и мощность к гипотезе H_0 .

Различные значения α -уровня имеют достоинства и недостатки. Меньшие α -уровни дают большую уверенность в том, что установленная альтернативная гипотеза значима, но при этом существует больший риск не отвергнуть ложную нулевую (или отвергнуть истинную альтернативную) гипотезу (ошибка II рода, или "ложноотрицательное решение"), и таким образом получить меньшую статистическую мощность. Выбор α -уровня неизбежно требует компромисса между значимостью и мощностью, следовательно, между вероятностями ошибок I и II рода [15].

Значение α устанавливается исходя из "научных конвенций" — соглашений, принятых в научном сообществе на основе практического опыта в различных областях исследования. Например, вероятность пропустить спам у современных антиспам-систем колеблется в пределах от 1 до 30 %. Вероятность ошибочно отвергнуть валидное сообщение — от 0,001 до 3 %. Выбор системы и ее настроек зависит от условий конкретного получателя: для одних получателей риск потерять 1 % хорошей почты оценивается как незначительный, для других потеря даже 0,1 % является недопустимой.

Таблица 2

Уровень значимости и мощность [16]

Событие	Наличие различий в действительности	
	Нулевая гипотеза неверна	Нулевая гипотеза верна
Нулевая гипотеза отклоняется	Истинно положительный результат $(1 - \beta)$	Ложно положительный результат α (ошибка I рода)
Нулевая гипотеза принимается	Ложно отрицательный результат β (ошибка II рода)	Истинно отрицательный результат $(1 - \alpha)$

Таблица 3

Уровни значимости и мощности

Методы	Уровень значимости	Мощность
Поиск по словарю	0,11	1
Модифицированный поиск по словарю	0,1	1
Нейронная сеть	0,04	0,95
Байесовский классификатор	0,03	0,96
Комбинированный метод	0,02	0,96

По результатам проведенного эксперимента уровни значимости и показатели мощности сведены в табл. 3.

Результаты вычислений показывают самый низкий уровень значимости для комбинированного из всех проверенных методов, что указывает на малую вероятность совершения ошибки I рода. Кроме этого, необходимо отметить, что при низком показателе уровня значимости мощность осталась на высоком уровне, что в совокупности доказывает эффективность разработанного комбинированного метода классификации информации по деструктивным индикаторам.

Заключение

В работе описан трехэтапный комбинированный метод классификации текстовой информации по деструктивным индикаторам. Предложенный метод включает нормализацию текста, модифицированный поиск по словарю и байесовский классификатор. Модифицированный поиск по словарю имеет отличительную способность к самонаполнению словаря новыми словоформами, что позволяет иметь актуальный набор деструктивных индикаторов. Байесовский классификатор имеет способность к самообучению, что повышает точность классификации входной текстовой информации. Оценка эффективности комбинированного метода показала, что он имеет низкую вероятность совершения ошибок, обеспечивая высокую точность результатов в сравнении с другими методами. Разработанный комбинированный метод является универсальным методом в решении задач в сфере классификации, идентификации и поиска требуемой информации.

Список литературы

1. Смирнов А. А. Негативный контент: проблемы идентификации в контексте правового регулирования // Информационное право. 2015. № 2. С. 18—25.

2. Федеральный закон от 29 декабря 2010 г. № 436-ФЗ "О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию" // Российская газета, 2010 г. URL: <https://www.rg.ru/2010/12/31/deti-inform-dok.html> (дата обращения 18.01.2020).

3. Роскомнадзор. Концепция информационной безопасности детей. URL: <http://rkn.gov.ru/mass-communications/p700/p701/> (дата обращения: 13.04.2019).

4. Байдулова Д. Р., Байтуменов А. З., Гостюнина В. А., Давидюк Н. В. Анализ содержательных индикаторов для решения задачи по возрастной классификации текстовой информации // Студенческая наука для развития информационного общества. Сб. Матер. IX Всеросс. науч.-техн. конф. 2019. С. 60—68.

5. Гостюнина В. А. Анализ требований Федерального закона № 436 для определения возрастной оценки Web-контента // I Междунар. науч.-техн. конференция "Актуальные вопросы использования технологий анализа данных и искусственного интеллекта" (Астрахань, Астраханский государственный университет, 6—8 ноября 2018 г.) — молодежная секция. 2018. С. 39—43.

6. Гостюнина В. А., Давидюк Н. В., Давидюк В. В., Байтуменов А. З. Процедура оценки степени доверия эксперту на примере задачи возрастного категорирования веб-контента // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 2. С. 86—97.

7. Gostyunina V. A., Davidyuk N. V. The combined method of textual information analysis for the content of destructive indicators // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399(1). P. 033109(1-7). doi:10.1088/1742-6596/1399/3/033109.

8. Гостюнина В. А., Давидюк Н. В., Байдулова Д. Р. Модуль для идентификации деструктивной информации в web-контенте с применением интеллектуальной обработки данных / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019660776, 13.08.2019. Заявка № 2019619095 от 23.07.2019.

9. Флаж П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / Пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2015. 400 с.

10. Sipser M. Introduction to the Theory of Computation. Boston: Cengage Learning, 2013. 445 p.

11. Давидюк Н. В., Гостюнина В. А., Байдулова Д. Р. Интеллектуальный алгоритм идентификации деструктивной информации в тексте // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 2. С. 29—39.

12. Давидюк Н. В., Гостюнина В. А., Байдулова Д. Р. Идентификация деструктивной информации в web-контенте с применением интеллектуальной обработки данных // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ. 2019. Т. 12. Ч. 1. С. 206—210.

13. Tang B. Toward optimal feature selection in naive Bayes for text categorization // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 28(9), 2016. С. 2508—2521.

14. Байдулова Д. Р., Гостюнина В. А., Давидюк Н. В. Идентификация деструктивной информации с использованием интеллектуального метода Байеса // Каспий в эпоху цифровой экономики материалы Междунар. науч.-практ. форума. 2019. С. 151—154.

15. Савинов А. Н., Иванов В. И. Анализ решения проблем возникновения ошибок первого и второго рода в системах распознавания клавиатурного почерка / Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева. 2011. № 18. С. 120—125.

16. Выборнова О. Н. Управление рисками обработки информации на основе экспертных оценок / Автореферат дис. кандидата технических наук. Кубан. гос. технол. ун-т. Астрахань, 2017.

Development and Research of a Combined Method for Classifying Textual Information by Destructive Indicators

As part of the work, the problem of identifying destructive information is considered, which reduces to the task of classifying the analyzed text information based on the presence or absence of destructive indicators. The article describes a universal combined method for classifying textual information by destructive indicators. The proposed method consists of three stages: data normalization, a modified dictionary search, and a Bayesian classifier. The article evaluates the performance of the described combined method.

Keywords: internet, destructive content, destructive indicator, classification of textual information, combined method, data normalization, automated search, Bayesian classifier, machine learning

DOI: 10.17587/it.26.402-409

References

1. Smirnov A. A. Negative content: identification problems in the context of legal regulation, *Information Law*, 2015, no. 2, pp. 18–25 (in Russian).
2. Federal law dated December 29, 2010 No. 436-ФЗ "On the protection of children from information harmful to their health and development", *Rossiyskaya Gazeta*, 2010, available at: www.rg.ru/2010/12/31/deti-inform-dok.html (accessed: 01/18/2020) (in Russian).
3. Roskomnadzor, The concept of children's information security, available at: <http://rkn.gov.ru/mass-communications/p700/p701/> (accessed: 01/18/2020) (in Russian).
4. Baidulova D. R., Baitumenov A. Z., Gostyunina V. A., Davidyuk N. V. Analysis of content indicators for solving the problem of age classification of textual information, *Student science for the development of information Society Collection of materials of the IX All-Russian scientific and technical conference*, 2019, pp. 60–68 (in Russian).
5. Gostyunina V. A. Analysis of the requirements of Federal Law No. 436 for determining the age rating of Web content, *I International Scientific and Technical Conference "Actual Issues of Using Data Analysis Technologies and Artificial Intelligence" Collection of materials of the International Conference* (Astrakhan, Astrakhan State University, November 6–8, 2018) youth section, Under the scientific editorship of S. V. Okladnikova, 2018, pp. 39–43 (in Russian).
6. Gostyunina V. A., Davidyuk N. V., Davidyuk V. V., Baitumenov A. Z. The procedure for assessing the degree of trust in an expert using the age-categorization problem for web content as an example, *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computing and Informatics*, 2019, no 2, pp. 86–97 (in Russian).
7. Gostyunina V. A., Davidyuk N. V. The combined method of textual information analysis for the content of destructive indicators, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1399(1), pp.033109(1-7), doi:10.1088/1742-6596/1399/3/033109.
8. Gostyunina V. A., Davidyuk N. V., Baidulova D. R. Module for identifying destructive information in web content using intellectual data processing, Certificate of registration of a computer program RU 2019660776, 08/13/2019. Application No. 2019619095 from 07/23/2019.
9. Flach P. Machine learning. Science and the art of constructing algorithms that extract knowledge from data, Per. from English A. A. Slinkin, Moscow, DMK Press, 2015.
10. Sipser M. Introduction to the Theory of Computation, Cengage Learning, 2013, 445 p.
11. Davidyuk N. V., Gostyunina V. A., Baidulova D. R. Intelligent algorithm for identifying destructive information in the text, *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computing Engineering and Computer Science*, 2019, no. 2, pp. 29–39 (in Russian).
12. Davidyuk N. V., Gostyunina V. A., Baidulova D. R. Identification of destructive information in web content using intelligent data processing, *Mathematical Methods in Engineering and Technology — MMTT*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 206–210 (in Russian).
13. Tang B. Toward optimal feature selection in naive Bayes for text categorization, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2016, pp. 2508–2521.
14. Baidulova D. R., Gostyunina V. A., Davidyuk N. V. Identification of destructive information using the Bayesian intellectual method, *The Caspian in the era of the digital economy, materials of the International Scientific and Practical Forum*, 2019, pp. 151–154 (in Russian).
15. Savinov A. N., Ivanov V. I. Analysis of the solution to the problems of the occurrence of errors of the first and second kind in recognition systems for keyboard writing, *Bulletin of the Volga University. V. N. Tatishchev*, 2011, no. 18, pp. 120–125 (in Russian).
16. Vybornova O. N. Management of information processing risks on the basis of expert estimates, Abstract dis. Candidate of Technical Sciences, Kuban. state tech-nol. un-t Astrakhan, 2017 (in Russian).

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

УДК 520.88

DOI: 10.17587/it.26.410-418

С. П. Симаков, аспирант, e-mail: simbal393@gmail.com,
Самарский университет имени академика С. П. Королева
(национальный исследовательский университет)

Статистическое исследование генетического алгоритма дифференциальной эволюции для обработки оптических изображений

Рассмотрено использование генетического алгоритма дифференциальной эволюции для определения ориентации и положения объекта относительно оптического сенсора по серии кадров, сделанных сенсором. В качестве измерительных средств при этом используются коммерческие оптические камеры. Проведено статистическое исследование генетического алгоритма дифференциальной эволюции на модельной задаче отделения наноспутника от орбитальной ступени, включающее в себя исследование влияния параметров настройки алгоритма (гиперпараметров) на точность получаемого результата. Валидация оценок проводится с использованием нелинейного метода наименьших квадратов. Приведены зависимости ошибок в определении относительной ориентации и относительного положения, полученные с помощью двух алгоритмов. Исследование показывает, что генетический алгоритм дифференциальной эволюции можно применять в различных задачах обработки информации с оптических датчиков.

Ключевые слова: наноспутник, метод наименьших квадратов, оптический сенсор, относительные параметры движения, генетический алгоритм дифференциальной эволюции, инспектор, объект наблюдения

Введение

Нарастающие усложнение и увеличение информационного потока, а также увеличение скорости обработки данных позволяют решать задачи, считавшиеся раньше крайне энергозатратными и ресурсоемкими. Одной из таких является задача обработки измерительной информации, получаемой с оптического сенсора — кино/фотокамеры, для задач идентификации быстропротекающих процессов в космическом пространстве, таких как разделение космических аппаратов или их частей, раскрытие элементов конструкции.

При этом под идентификацией быстропротекающих процессов в механических системах в данной работе понимается определение характеристик как движения центра масс объекта, так и движения объекта относительно центра масс.

Рассмотрим методы обработки информации, полученной посредством оптического датчика, более подробно.

Одна из возможных методик определения параметров движения объекта относительно датчика представлена в работе [1]. Новый подход,

содержащий сигма-точечный фильтр Калмана, используется здесь для определения параметров движения. Также в работе используется особая модель измерений, которая преобразует полученные по результатам обработки видеоизображения пиксельные координаты ориентиров в компоненты линии визирования [2, 3].

В статье [4] рассматривается экспериментальное определение линейных и угловых скоростей вращающегося цилиндра двумя экспериментальными методами, один из которых является оптическим. Для фиксирования положения цилиндра при этом применяется скоростная видеокамера.

В работе [5] описывается подход, в основу которого положено использование информации, получаемой с оптического датчика. Авторы проводят с помощью разработанного подхода верификацию эксперимента по сближению двух инженерных моделей космических аппаратов. Но данный метод проверяется на работоспособность только в плоском случае, что является несомненным минусом работы. Таким образом, встает вопрос о разработке подхода, способного определять положение и ориентацию объекта в пространстве с заданной точностью.

Целью данной работы является статистическое исследование генетического алгоритма дифференциальной эволюции (DE) в его применении к задачам обработки оптических изображений для определения характеристик углового и линейного движения инспектора относительного объекта наблюдения, валидация данного алгоритма нелинейным методом наименьших квадратов (NLS).

Этап обработки и слежения за нужными сегментами изображений в данной работе не рассматривается. Подразумевается, что положение реперных точек на поверхности объекта наблюдения относительно его центра масс известно заранее.

Постановка задачи и математическая модель оптического сенсора

Будем использовать следующие системы координат:

1. Связанная система координат объекта наблюдения (ССК) $OXYZ$ с началом в центре масс объекта. Ось OX направлена вдоль продольной оси объекта. Ось OY располагается в плоскости симметрии, совпадающей с плоскостью траектории, и направлена вверх. Ось OZ дополняет систему координат до правой.

2. Система координат, связанная с оптическим сенсором (СКС), установленном на инспекторе, $O_{\text{сху}}z$ с началом в оптическом центре камеры. Ось z направлена параллельно оптической оси. Ось x и y формируют проецирующую плоскость $O_{\text{сху}}$.

3. Система координат плоскости матрицы оптического сенсора (СКК) $O_p uv$ с началом в верхнем левом углу фотокадра. Ось $O_p u$ направлена по горизонтали вправо, ось $O_p v$ — по вертикали вниз.

Выбранные системы координат представлены на рис. 1, 2.

Таким образом, под понятием относительного положения понимается положение центра масс объекта наблюдения относительно сенсора, установленного на инспекторе, в системе координат, связанной с сенсором.

В данной работе также используются модифицированные параметры Родриго (MRP) [6] для описания вращательного движения.

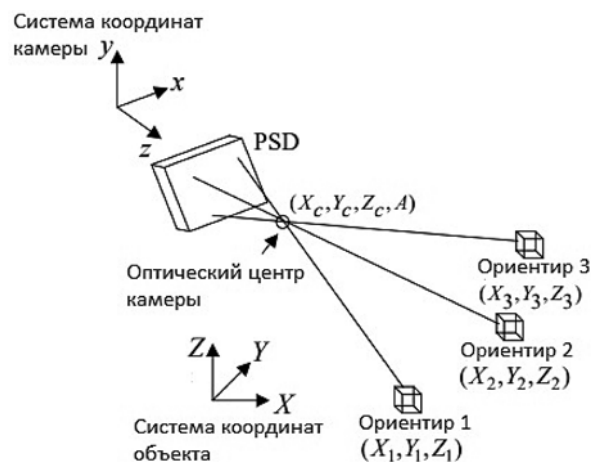


Рис. 1. Выбранные системы координат

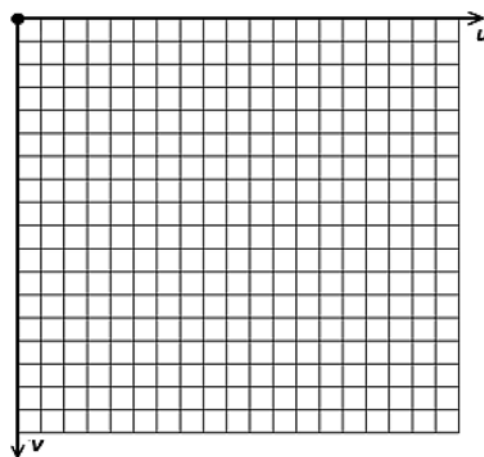


Рис. 2. Система координат плоскости матрицы оптического сенсора

MRP можно определить как

$$\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]^T = \text{etg} \left(\frac{\Phi}{4} \right),$$

где $\mathbf{e} = [e_1, e_2, e_3]^T$ — единичный вектор, направление которого совпадает с осью вращения; Φ — угол вращения.

Матрица перехода между системами координат имеет вид

$$A = [I_{3 \times 3}] \frac{8\sigma^2 - 4(1 - \sigma^2)\sigma}{(1 + \sigma^2)^2},$$

или в развернутой форме:

$$A = \frac{1}{(1 + \sigma^2)^2} \begin{bmatrix} 4(\sigma_1^2 - \sigma_2^2 - \sigma_3^2) + (1 - \sigma^2)^2 & 8\sigma_2\sigma_1 + 4\sigma_3(1 - \sigma^2) & 8\sigma_3\sigma_1 - 4\sigma_2(1 - \sigma^2) \\ 8\sigma_2\sigma_1 - 4\sigma_3(1 - \sigma^2) & 4(-\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_3^2) + (1 - \sigma^2)^2 & 8\sigma_3\sigma_2 + 4\sigma_1(1 - \sigma^2) \\ 8\sigma_3\sigma_1 + 4\sigma_2(1 - \sigma^2) & 8\sigma_3\sigma_2 - 4\sigma_1(1 - \sigma^2) & 4(-\sigma_1^2 - \sigma_2^2 + \sigma_3^2) + (1 - \sigma^2)^2 \end{bmatrix}.$$

Используемые модели

Модель движения объекта наблюдения относительно инспектора в проекции на оси $O_{\text{хуз}}$ определяется уравнениями относительного движения, представленными в работе [7]

В свою очередь, вращательное движение объекта наблюдения в осях $OXYZ$ определяется уравнениями, представленными в работе [8]. Единственным отличием при этом будет использование MRP в качестве параметров, описывающих относительную ориентацию.

Рассмотрим далее модель измерений оптического сенсора.

Модель камеры, используемая в данной работе, является классической для задач обработки измерений с оптических сенсоров [9], а преобразование пиксельных координат в компоненты, составляющие вектор визирования, впервые встречается в работах [2,10].

Выберем некоторую точку i на поверхности объекта наблюдения, радиус-вектор которой имеет вид $r_{\text{ССК}}^i = [X_i, Y_i, Z_i]^T$ в ССК. В СКС эта точка имеет координаты $r_{\text{КСК}}^i = [x_i^c, y_i^c, z_i^c]^T$.

Геометрическая интерпретация представлена на рис. 3.

Проекцию особой точки на проецирующую плоскость сенсора без учета искажений можно записать как

$$u_i = -f(x_i^c/z_i^c);$$

$$v_i = -f(y_i^c/z_i^c)$$

или в развернутом виде:

$$\begin{aligned} u_i &= \\ &= -f \frac{A_{11}(X_i - X_c) + A_{12}(Y_i - Y_c) + A_{13}(Z_i - Z_c)}{A_{31}(X_i - X_c) + A_{32}(Y_i - Y_c) + A_{33}(Z_i - Z_c)}, \\ v_i &= \\ &= -f \frac{A_{21}(X_i - X_c) + A_{22}(Y_i - Y_c) + A_{23}(Z_i - Z_c)}{A_{31}(X_i - X_c) + A_{32}(Y_i - Y_c) + A_{33}(Z_i - Z_c)}, \end{aligned}$$

где N — число измеряемых в один момент точек (x_i, y_i) ;

(u_i, v_i) — координаты особой точки в СКС, пкс;

(X_i, Y_i, Z_i) – координаты особой точки в ССК, м;

(X_c, Y_c, Z_c) — неизвестные координаты оптического сенсора в ССК, м;

f — фокусное расстояние, м;

A_{ij} — компоненты матрицы перехода из ССК в ССК.

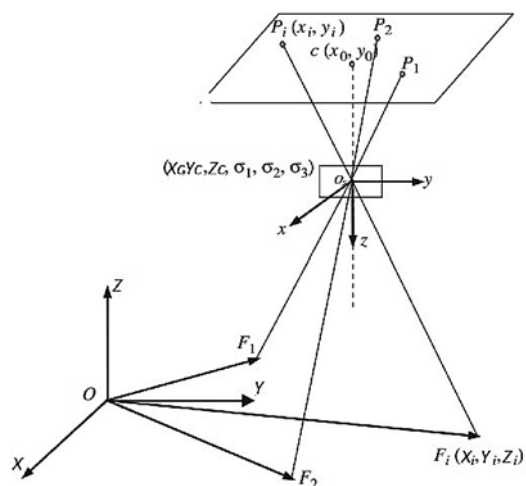


Рис. 3. Соотношения между системами координат и особые точки

Измерение в момент времени t определяется как

$$m_i \equiv \frac{1}{\sqrt{f^2 + x_i^2 + y_i^2}} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ -f \end{bmatrix}.$$

Вместе с тем, измерение в момент времени t можно записать как набор единичных векторов в форме

$$m_i = Ar_i, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

r_i — радиус-вектор, который имеет вид

$$r_i = \frac{1}{\sqrt{(X_i - X_c)^2 + (Y_i - Y_c)^2 + (Z_i - Z_c)^2}} \times \begin{bmatrix} (X_i - X_c) \\ (Y_i - Y_c) \\ (Z_i - Z_c) \end{bmatrix}.$$

Благодаря внутренним особенностям камеры реальные измерения оказываются зашумлены.

Модель измерений с учетом данного шума можно записать как

$$\tilde{b}_j = m_j(x) + v_j,$$

где $\tilde{b}_i$ — измеренный вектор линии визирования i особой точки;

$x = [p, \sigma]^T$ — вектор состояния, содержащий относительное расстояние и относительную ориентацию;

$m_i(x) = A(\sigma_i)r_i$ — вектор линии визирования, построенный без учета шума.

Шум навигационный камеры моделируется посредством нормального распределения с ну-

левым математическим ожиданием и ковариационной матрицей ошибок измерений R_i :

$$E[v_i] = 0,$$

$$E[v_i v_j^T] = R_i \delta_{ij}.$$

Метод обработки оптических изображений

Для определения относительной ориентации и положения объекта используем генетический алгоритм дифференциальной эволюции [1–13].

Принцип работы DE заключается в следующем.

1. Создание популяции

В качестве начальной популяции выбирается случайный набор из N векторов из пространства R^n .

2. Оценка популяции

Проводится оценка популяции с помощью функции рассогласования. Следует отметить, что конкретный вид данной функции будет выбран в рамках текущего исследования.

3. Сортировка популяции

Популяция упорядочивается по условию минимума полученной оценки функции рассогласования (проводится сортировка массива с векторами популяции по минимуму функции рассогласования).

4. Создание новых векторов популяции.

На очередном шаге алгоритма выполняется скрещивание каждой особи X из исходной популяции со случайно выбранной особью C , отличной от X . Координаты векторов X и C рассматриваются как генетические признаки. Перед скрещиванием применяется специальный оператор мутации — в скрещивании участвуют не исходные, а искаженные генетические признаки особи C :

$$C'_j = C_j + F(A_j - B_j),$$

где C'_j — искаженный признак вектора C ; C_j — исходный признак вектора C ; A_j, B_j — признак, выбранный случайно из сгенерированных в п. 1 векторов популяции; F — возмущение, вносимое в значение C'_j .

На данном этапе особое внимание следует уделить параметру F . Значение параметра является сугубо индивидуальным для каждой задачи и выступает в качестве предмета исследования текущей работы. Значение выбирается из диапазона, предложенного в работе [14].

5. Создание новых векторов популяции (скрещивание).

Скрещивание выполняется следующим образом. Задается вероятность P , с которой потомок T наследует очередной (искаженный мутацией) генетический признак от родителя C . Соответствующий признак от родителя X наследуется с вероятностью $(1 - P)$. Фактически n раз разыгрывается бинарная случайная величина с математическим ожиданием P , и наследуется искаженный генетический признак от родителя C или генетический признак от родителя X . В результате формируется вектор-потомок T .

6. Отбор векторов.

После формирования вектора-потомка T проводится сравнение функции рассогласования для него и для его "прямого" родителя X . В новую популяцию переносится тот из векторов X и T , на котором целевая функция достигает меньшего значения. Здесь необходимо заметить, что описанное правило отбора гарантирует неизменность размера популяции в процессе работы алгоритма.

Схема работы алгоритма представлена на рис. 4.

Для валидации полученных данных будет использоваться алгоритм, основанный на нелинейном методе наименьших квадратов (NLS).

Нелинейный метод наименьших квадратов — математический метод, применяемый для решения различных задач, основанный на минимизации суммы квадратов отклонений некоторых функций от искомым переменных. NLS является одним из базовых методов регрессионного анализа для оценки неизвестных параметров регрессионных моделей по выборочным данным.

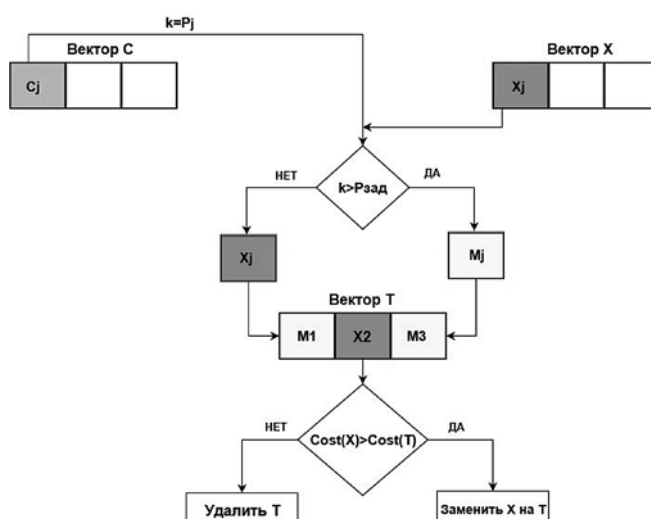


Рис. 4. Схема работы DE

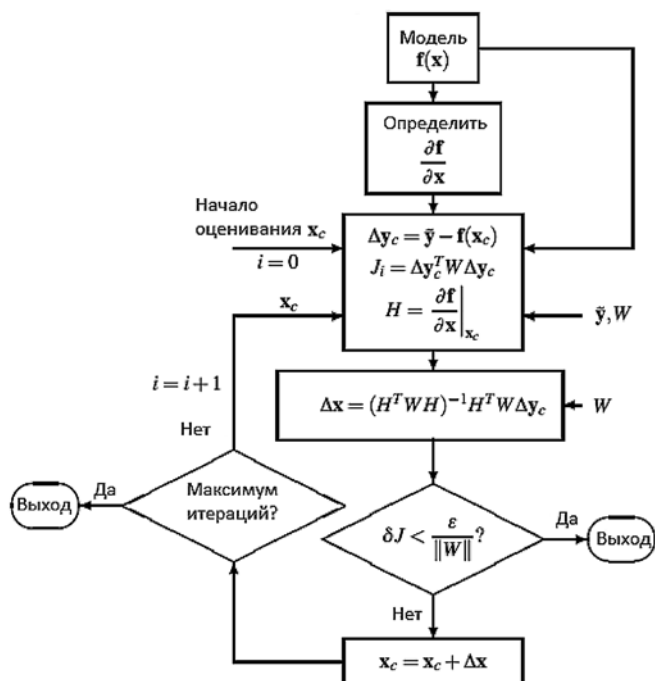


Рис. 5. Структурная схема алгоритма

Структурная схема алгоритма приведена на рис. 5.

Как видно из рис. 5, для реализации подхода необходимо знать также производные модели измерений по переменным вектора состояния.

Также необходимо знание о матрице весовых коэффициентов. Условимся, что матрица весовых коэффициентов имеет вид диагональной матрицы W со значениями $w_{ij} = 10^{-6}$ на главной диагонали.

Модельная задача

В качестве примера взят численный эксперимент по определению относительного положения и ориентации орбитальной ступени (ОС) с наноспутника при отделении его от ОС, выполняемом на типовой для наноспутников высоте полета и при небольших угловых скоростях. Разделение происходит по продольной оси объектов. Время моделирования составляет 20 с, временной интервал между двумя измерениями 0,1 с. Схема разделения представлена на рис. 6.

Параметры движения ОС относительно наноспутника будут определяться посредством шести ориентиров (без учета случая варьирования числа ориентиров). Определение относительных параметров движения в рамках задачи стартует только после полной видимости всех ориентиров на кадре, сделанном оптиче-

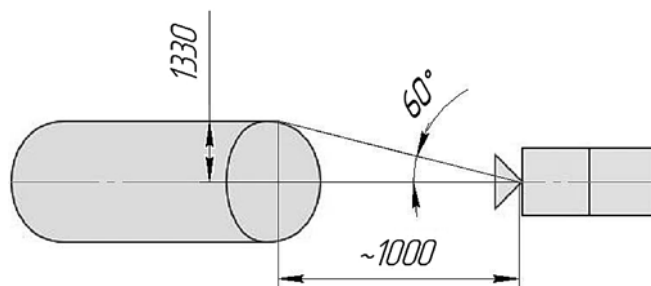


Рис. 6. Схема разделения

ским сенсором (на расстоянии примерно 1 м по программе отделения). Ниже приведены высота орбиты разделения, угловые скорости, сообщаемые при разделении, массоинерционные и габаритные характеристики ОС.

Параметры орбиты

Высота, км. 400

Параметры разделения

Угловые скорости, °/с

ω_x 0
 ω_y 4
 ω_z 4

Линейные скорости, м/с

V_x 1.0
 V_y 0
 V_z 0

Массоинерционные и габаритные характеристики

I_x 2396,9
 I_y, I_z 11470
 Длина, м 6,745
 Масса, кг 2710

В табл. 1 приведены данные о положении рассматриваемых на ОС ориентиров, на рис. 7 — габаритные размеры объекта наблюдения.

Таблица 1

Положение ориентиров в метрах

№	1	2	3	4	5	6
X, м	3,373	3,373	3,373	3,373	3,373	3,373
Y, м	0	1,33	0	0	-1,33	1,33
Z, м	0	0	1,33	-1,33	0	1,33

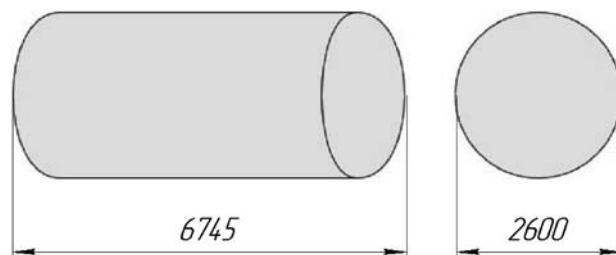


Рис. 7. Габаритные размеры объекта наблюдения

Исследование гиперпараметров алгоритма дифференциальной эволюции

Для оценки вероятностных величин, используемых в алгоритме, используется метод статистических испытаний. Число испытаний определяется из соотношения [15]

$$N = \frac{1}{\varepsilon^2},$$

где N — число проведенных испытаний; ε — требуемая точность оценки вероятностных величин.

Так, для достижения 5 %-ной точности требуется провести не менее 400 испытаний.

Математическое ожидание вероятностной величины оценивается по соотношению

$$M_x = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N},$$

где N — число проведенных испытаний; X_i — значение вероятностной величины; M_x — математическое ожидание вероятностной величины.

Среднеквадратическое отклонение находится по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - M_x)^2}{n - 1}}.$$

Рассмотрим, при какой вероятности скрещивания удастся добиться наилучшего решения.

Будем оценивать ошибку, полученную алгоритмом на каждом шаге, и рассмотрим, как меняется ошибка с ростом вероятности скрещивания.

Результаты 400 моделирований на интервале 20 с с шагом 0,1 с и шагом 0,1 по пороговому значению вероятности скрещивания P представлены в табл. 2 (см. вторую сторону обложки).

Следует заметить, что синий цвет соответствует меньшим значениям ошибки, а красный — большим.

Четко прослеживается следующая тенденция. При увеличении вероятности скрещивания уменьшается ошибка при решении задачи на заданном интервале, соответственно лучшими будут достаточно высокие значения пороговой вероятности.

Далее определимся, при какой степени мутации на этапе генерации новых векторов популяции удастся добиться лучшего решения.

Результаты 400 моделирований на интервале 20 с с шагом 0,1 с и шагом 0,1 по степени

мутации представлены в табл. 3 (см. вторую сторону обложки).

Минимум ошибки наблюдается в табл. 3 в интервале 0,4...0,9, в качестве минимального значения из этого интервала можно выделить 0,8.

Оценим также число реперных точек на поверхности объекта и определим моментные характеристики для каждого набора точек.

Результаты 400 моделирований на интервале 20 с с шагом 0,1 с представлены в табл. 4, 5.

Оценим также время выполнения одной итерации. Гистограмма со средним временем исполнения одной итерации по 400 моделированиям приведена на рис. 8. Выполнение проводилось на стенде с характеристиками: Intel(R) Core(TM) i7-7700 CPU @ 3.60GHz.

Отчетливо виден рост времени выполнения одной итерации (с 1,6 мс до 136,4 мс) при росте числа реперных точек (с 10 до 1000 точек), а следовательно, одномоментных измерений.

Таблица 4

Максимальное значение средней ошибки

Число точек	Среднее значение ошибки $\bar{\Delta}$					
	$\bar{\Delta}_\psi$	$\bar{\Delta}_\theta$	$\bar{\Delta}_\phi$	$\bar{\Delta}_x$	$\bar{\Delta}_y$	$\bar{\Delta}_z$
10	0,349	0,221	0,550	0,576	0,574	0,438
100	0,142	0,232	0,203	0,234	0,373	0,226
1000	0,023	0,034	0,039	0,173	0,160	0,212

Таблица 5

Среднеквадратическое отклонение

Число точек	Среднеквадратическое отклонение σ					
	σ_ψ	σ_θ	σ_ϕ	σ_x	σ_y	σ_z
10	0,02	0,022	0,023	0,077	0,072	0,081
100	0,03	0,024	0,012	0,038	0,035	0,028
1000	0,008	0,014	0,006	0,022	0,015	0,018

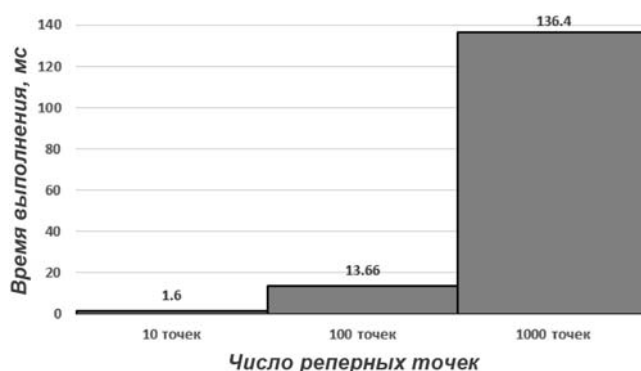


Рис. 8. Время выполнения одной итерации алгоритма для различного набора реперных точек

Сравнение результатов работы алгоритма дифференциальной эволюции с нелинейным методом наименьших квадратов

Получим теперь оценки точности для алгоритма дифференциальной эволюции в сравнении с нелинейным методом наименьших квадратов, описанным ранее.

В качестве исходных данных будем также использовать модельную задачу разделения наноспутника и ОС в варианте с шестью реперными точками, представленными в табл. 2 (см. вторую сторону обложки). Определимся с начальными условиями алгоритмов.

Начальные условия DE:

$$\text{bounds} = [(0,50);(0,20);(0,20);(-0.1,0.1);(-0.1,0.1);(-0.1,0.1)];$$

фокусное расстояние $f = 0,05$ м, пороговое значение вероятности скрещивания $P = 0,97$, размер популяции $size = 20$ особей, максимальное число итераций $iter = 200$, степень мутации $F = 0,8$.

Начальные условия NLS:

$$\text{bounds} = [3.5,2.6,2.6,1e-6,1e-6,1e-6].$$

Результаты 400 моделирований на интервале 20 с с шагом 0,1 с представлены на рис. 9, 10.

Анализируя графики, можно сделать вывод, что ошибка для DE при решении модельной задачи не превышает $0,05^\circ$, тогда как у NLS она составляет не более $0,5^\circ$. Аналогичная ситуация проявляется и для ошибки в определении относительного положения. Ошибка для DE при решении модельной за-

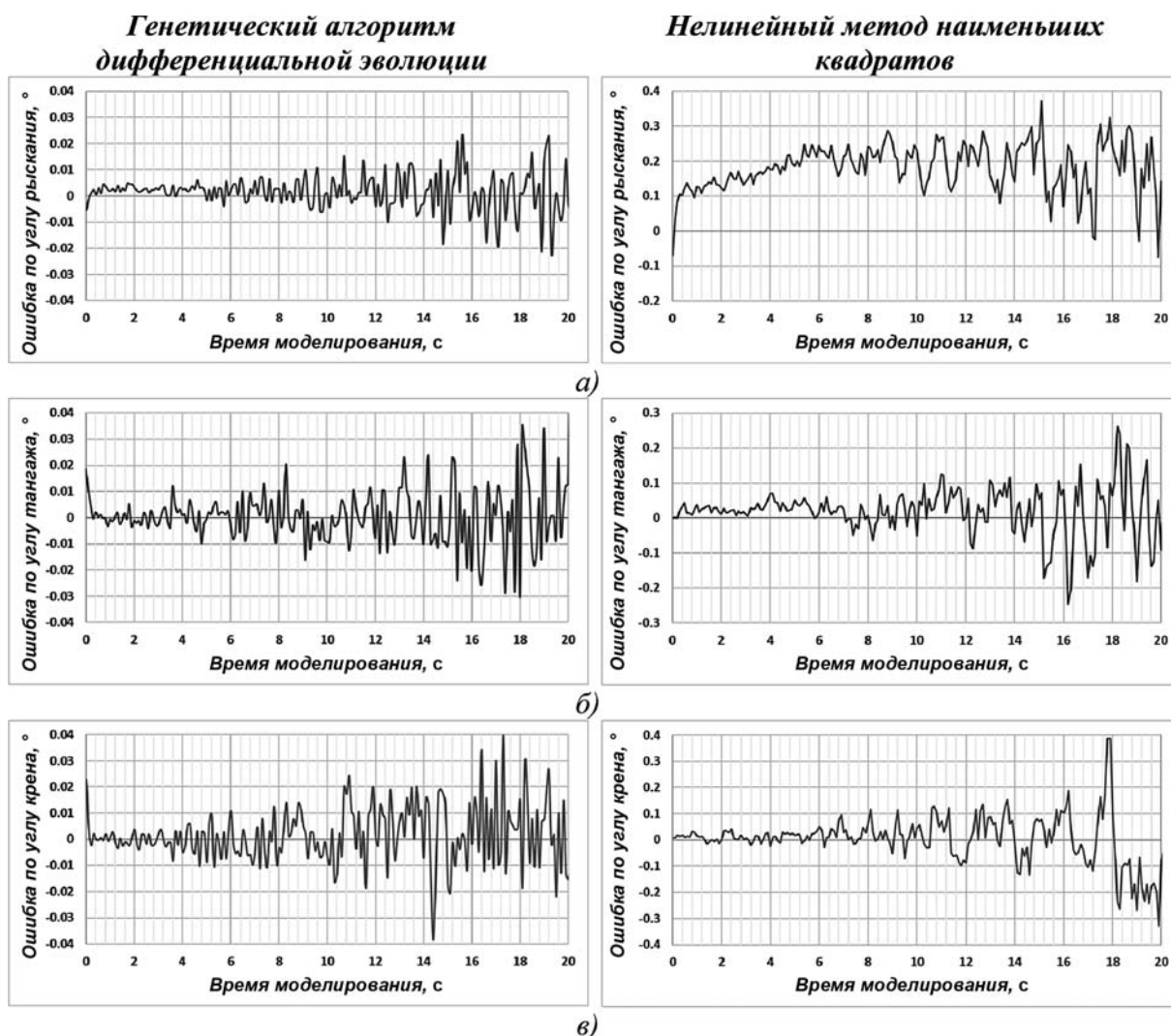


Рис. 9. Ошибки определения относительной ориентации при решении модельной задачи для двух алгоритмов:

а — ошибка по углу рыскания; б — ошибка по углу тангажа; в — ошибка по углу крена

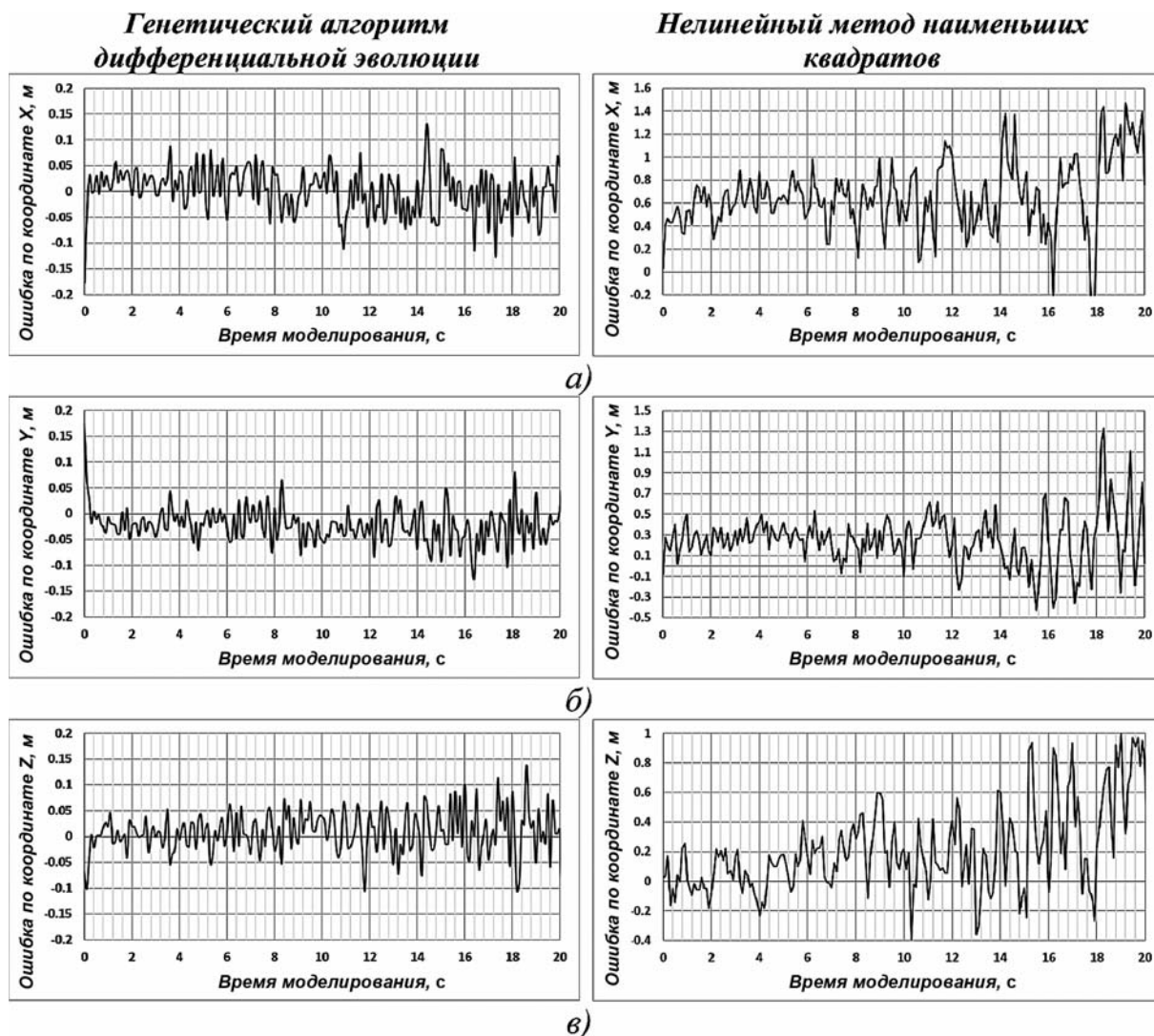


Рис. 10. Ошибки определения относительного положения при решении модельной задачи для двух алгоритмов:
а — ошибка по координате X_c ; *б* — ошибка по координате Y_c ; *в* — ошибка по координате Z_c

дачи не превышает 0,2 м, а для NLS ошибка составляет 1...2 м.

Закключение

В рамках работы было проведено статистическое исследование генетического алгоритма дифференциальной эволюции, включающее в себя исследование влияния параметров настройки алгоритма (гиперпараметров) на точность получаемого результата. Было выявлено, что с ростом числа одномоментных измерений точность алгоритма увеличивается: средняя ошибка по углам относительной ориентации уменьшается с десятых долей градуса до сотых долей градуса, а по компонентам относительного расстояния уменьшается с 0,6 м до 0,1 м соответственно. При этом с ростом точности

значительно растет и время выполнения одной итерации: с 1,6 мс до 136,4 мс соответственно.

Также было проведено сравнение решения модельной задачи с помощью двух алгоритмов (DE и NLS) для шести реперных точек на поверхности объекта наблюдения.

Выявлено, что при схожих условиях DE показывает точность решения, большую на один порядок. Например, ошибка DE при решении модельной задачи не превышает 0,05°, тогда как у NLS она составляет не более 0,5°. Похожая ситуация проявляется и для ошибки в определении относительного положения: ошибка DE при решении модельной задачи не превышает 0,2 м, а для NLS ошибка составляет 1...2 м.

Исследование показывает, что генетический алгоритм дифференциальной эволюции можно применять в различных задачах обработки информации с оптических датчиков.

Список литературы

1. Lee D., Pernicka H. Vision-Based Relative State Estimation Using the Unscented Kalman Filter // *Int'l J. of Aeronautical & Space Sci.* 2011. Vol. 12. P. 24–36.
2. Junkins J. L., Hughes D. C., Wazni K., Parriyapong V. Vision based navigation for rendezvous, docking and proximity operations // *22nd Annual AAS Guidance and Control Conference*. Breckenridge. 1999. AAS 99-021.
3. Tang X., Zhong D. Square-root sigma-point Kalman filtering for spacecraft relative navigation // *Acta Astronautica*, 2010. Vol. 66. P. 704–713.
4. Борисов А. В., Караваев Ю. Л. Экспериментальное исследование движения тела с осесимметричным основанием, скользящего по шероховатой поверхности // *Нелинейная динамика*. 2015. Т. 11. № 3. С. 547–577.
5. Sabatini M. A testbed for visual based navigation and control during space rendezvous operations // *Acta Astronautica*. 2015. N.117. P. 184–196.
6. Schaub H., Junkins J. L. *Analytical Mechanics of Space Systems*. AIAA education series, 2009. P. 795.
7. Апазов Р. Ф., Сытин О. Г. Методы проектирования траекторий носителей и спутников Земли. М.: Наука, 1987. 440 с.
8. Попов В. И. Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов. М: Машиностроение, 1986. 184 с.
9. Junkins J. L., Crassidis J. L. *Optimal Estimation of Dynamic Systems*. Taylor and Francis Group LLC, 2012. P. 733.
10. Gunnam K. K., Hughes D. C., Junkins J. L., Kehtarnavaz N. A vision based DSP embedded navigation sensor // *IEEE Sensor Journal*. 2002. Vol. 5. P. 428–442.
11. Price K. *Differential Evolution — A Practical Approach to Global Optimization*. Berlin: Springer, 2005. P. 539.
12. Сабанин В. Р., Репин А. И. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации в управлении // *Exponenta pro: математика в приложениях*, 2004. № 3–4. С. 78–85.
13. Кирсанов М. Н. Генетический алгоритм оптимизации стержневых систем // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2010. № 2 (229). С. 60–63.
14. Storn R., Price K. *Differential Evolution — A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces* // *Journal of Global Optimization*. 1997. V. 11. P. 341–359.
15. Белоконов И. В. Статистический анализ динамических систем (анализ движения летательных аппаратов в условиях статистической неопределенности). Самара: Самарский госуд. аэрокосм. ун-т, 2001.

S. P. Simakov, Postgraduate Student, e-mail: simbal393@gmail.com,
Samara University

Statistical Study of the Differential Evolution Algorithm for Processing Optical Measurements

In this article were discussed the using of the genetic algorithm of differential evolution to determine the orientation and position of an object relative to an optical sensor by means a series of frames. In this case, commercial optical cameras are used as measuring means. A statistical study of the genetic algorithm of differential evolution was conducted. The study was conducted on the model problem of separation of two objects. Validation of estimates is carried out using the nonlinear least squares method. The paper presents the dependencies of errors in determining the relative orientation and relative position obtained using two algorithms. The study shows that the genetic algorithm of differential evolution can be used in various problems of processing information from optical sensors.

Keywords: nanosatellite, least squares algorithm, optical sensor, relative motion parameters, differential evolution algorithm, inspector, observation object

DOI: 10.17587/it.26.410-418

References

1. Lee D., Pernicka H. Vision-Based Relative State Estimation Using the Unscented Kalman Filter, *Int'l J. of Aeronautical & Space Sci.*, 2011, vol. 12, pp. 24–36.
2. Junkins J. L., Hughes D. C., Wazni K., Parriyapong V. Vision based navigation for rendezvous, docking and proximity operations, *22nd Annual AAS Guidance and Control Conference*, Breckenridge, 1999, AAS 99-021.
3. Tang X., Zhong D. Square-root sigma-point Kalman filtering for spacecraft relative navigation, *Acta Astronautica*, 2010, vol. 66, pp. 704–713.
4. Borisov A. V., Karavaev Yu. L. An experimental study of the motion of a body with an axisymmetric base sliding on a rough surface, *Nonlinear dynamics*, 2015, vol. 11, no. 3, pp. 547–577 (in Russian).
5. Sabatini M. A testbed for visual based navigation and control during space rendezvous operations, *Acta Astronautica*, 2015, no. 117, pp. 184–196.
6. Schaub H., Junkins J. L. *Analytical Mechanics of Space Systems*, *AIAA Education Series*, 2009, p. 795.
7. Apazov R. F., Sytin O. G. Methods of designing the trajectories of a satellites, Moscow, Nauka, 1987, 440 p. (in Russian).
8. Popov V. I. Spacecraft orientation and stabilization systems, Moscow, Mashinostroenie, 1986, 184 p. (in Russian).
9. Junkins J. L., Crassidis J. L. *Optimal Estimation of Dynamic Systems*, Taylor and Francis Group LLC, 2012, pp. 733.
10. Gunnam K. K., Hughes D. C., Junkins J. L., Kehtarnavaz N. A vision based DSP embedded navigation sensor, *IEEE Sensor Journal*, 2002, vol. 5, pp. 428–442.
11. Price K. *Differential Evolution — A Practical Approach to Global Optimization*, Berlin, Springer, 2005, 539 p.
12. Sabanin V. R., Repin A. I. Modified genetic algorithm for optimization problems in guidance, *Exponenta Pro: Matematika v Prilozheniyah*, 2004, no. 3–4, pp. 78–85 (in Russian).
13. Kirsanov M. N. Genetic algorithm for optimizing pivot systems, *Stroitel'naya Mekhanika i Raschet Sooruzhenij*, 2010, no. 2 (229), pp. 60–63 (in Russian).
14. Storn R., Price K. *Differential Evolution — A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces*, *Journal of Global Optimization*, 1997, vol. 11, pp. 341–359.
15. Belokonov I. V. Statistical analysis of dynamical systems (analysis of aircraft movement under conditions of statistical uncertainty, Samara, Samara state aerosp. univ., 2001 (in Russian).

В. А. Маренко, канд. техн. наук, доц., e-mail: marenko@ofim.oscsbras.ru,
Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, г. Омск

Модель характеристик экономической системы как конформируемый образ рассуждений аналитика¹

В работе рассмотрена иерархическая модель характеристик экономической системы, сформированная по таксономическому принципу. Иерархия моделей показана на примере показателей "прибыль", "конкурентоспособность" и "лояльность клиентов". Результатом является стратифицированное описание объекта исследования, что позволяет изучать его с использованием различных средств, в том числе симплицального анализа. Проведены имитационные эксперименты для сравнения результатов до и после симплицального анализа.

Ключевые слова: модель, иерархия, система, граф, симплицальный анализ, имитационный эксперимент

Введение

Экономические системы являются сложными структурами, поэтому для исследования экономических проблем целесообразно использовать иерархический подход [1]. В теории многоуровневых иерархических систем предложены особые классы иерархических структур: слои, страты, эшелоны. Слои, или уровни сложности, служат для вертикальной декомпозиции объекта исследования. Концепция страт необходима для построения совокупности моделей, каждая из которых описывает один и тот же объект исследования с различных точек зрения. В результате получается стратифицированное описание объекта одновременно на разных уровнях иерархии. Чем выше страта, тем выше абстрагирование, тем отчетливее назначение объекта как единого целостного образования. Концепция эшелонов обеспечивает взаимосвязь между соответствующим уровнем описания целей системы и уровнем описания средств их достижения [2].

В работе ставилась задача представить путем вертикальной декомпозиции семейство моделей, которые описывают характеристики экономической системы на различных уровнях абстрагирования. С применением теоретико-

множественного подхода упорядоченное множество характеристик экономической системы представляется корневым графом $X = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, где X — обобщенная характеристика. Каждый уровень иерархии имеет свою особенность: рассмотрение на нижнем уровне детализирует представление об объекте, а на уровне, расположенном выше, яснее виден смысл, предназначение объекта в целом. В этом случае объект нижележащего уровня является подсистемой системы верхнего уровня иерархии.

Российские специалисты широко используют иерархический подход для разнообразных социально-экономических исследований. В статье К. В. Павлова [3] дается обоснование целесообразности использования понятия "экономическое ядро", под которым подразумевается совокупность точек роста и базисных элементов экономики. Рассмотрена идея вариативности экономического ядра на разных уровнях иерархии, критерии отбора элементов в "ядро" и их оптимизация [3]. С. П. Мишин решает задачу реализации управленческих функций в организации через создание иерархии, с помощью которой возможно повысить эффективность взаимодействия сотрудников на основе планирования и контроля материальных, информационных и других потоков [4]. Е. Е. Моностырская предлагает анализировать состояние социально-экономической системы с использованием иерархии потребностей человека. В ее

¹Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных научных исследований СО РАН № 1.5.1., проект № 0314-2019-0020.

работе приведен пример анализа экологического состояния окружающей среды с использованием разработанной иерархической системы потребностей [5]. Л. В. Жуковская исследовала иерархическую модель управления социально-экономической системой в условиях отсутствия идентичности структуры и однотипных объемов информации на примере системы социальной защиты населения [6].

Формирование иерархической модели характеристик экономической системы

Рассмотрение объекта исследования начинается с нижнего уровня иерархии. На первом этапе выявляются базисные факторы, оказывающие позитивное или негативное влияние на функционирование исследуемой системы. Далее проводится попарное сравнение выявленных факторов, используемых для формирования матрицы смежности, элементами которой являются экспертные оценки, отражающие величины и направления взаимовлияния базисных факторов. Из элементов матрицы смежности первого уровня формируются группы элементов второго уровня иерархии, соответствующие определенным характери-

кам объекта исследования. Верхний уровень представляет собой интегральный показатель, влияющий на функционирование исследуемой системы в целом.

Пример. В нашем примере на первом уровне иерархии представлена матрица смежности $A = \{a_{ij}\}$, $i, j = \overline{1, n}$, элементами которой являются экспертные оценки специалистов, полученные при попарном сравнении базисных факторов, влияющих на функционирование экономической системы, выявленных в ходе экспертных процедур, PEST и SWOT анализа (рис. 1).

Из элементов матрицы смежности первого уровня формируются совокупности элементов второго уровня, отражающие взаимовлияния факторов, соответствующих таким характеристикам экономической системы, как конкурентоспособность (K), прибыль (P), лояльность клиентов (L), логико-семантические образы которых представляются следующими формулами:

$K = f_1(q, cp, d, tx, s)$, где q — качество продукции (quality of product), cp — себестоимость продукции (cost of product), d — спрос на продукцию, (demand for product), tx — технологический уровень (technological level), s — внешние условия (стабильность) (stability);

$P = f_2(st, v, fn, s, c)$, где st — персонал (staff), v — объем производства (volume of finished products), fn — фонды (fund), s — услуги подрядчиков (services), c — затраты (cost);

$L = f_3(b, p, g, m, ec)$, где b — баланс (balance), p — квалификация персонала (personnel qualification), g — качество и количество товара (quality and quantity of goods), m — менеджмент (management), ec — внешние условия (environmental conditions).

Исходные зависимости K , P , L имеют иерархический вид, так как в формулы входят переменные, зависящие от других показателей. Например, показатель "объем производства" зависит от планов производства, количества ресурсов и т.д.

На третьем уровне иерархии формируется совокупность взаимосвязанных орграфов, матрицы которых указаны на втором уровне иерархии (рис. 1). Третий уровень иерархии представляется орграфом $G_{об} = (G, E) = (\{g_i, g_j\}, \{e_{ij}\})$, где g_i, g_j — вершины, e_{ij} — дуги, $i, j = \overline{1, n}$ (рис. 2).

В нашем примере вершинами обобщенного орграфа являются характеристики экономической системы в виде орграфов G_K, G_P, G_L и связи между ними. Таким образом, обобщенный

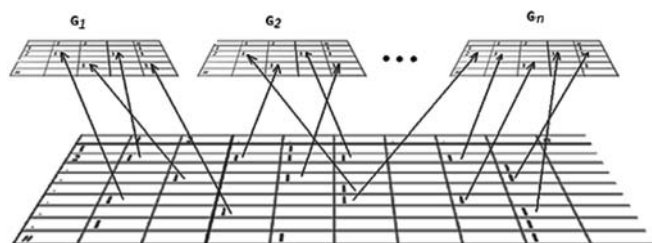


Рис. 1. Уровни рассмотрения характеристик экономической системы

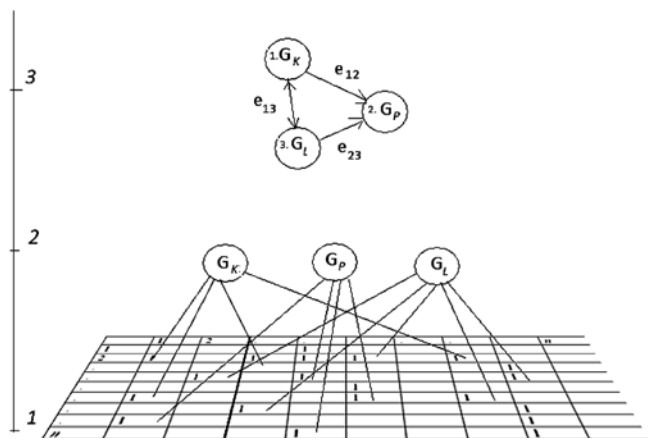


Рис. 2. Уровни иерархии характеристик экономической системы

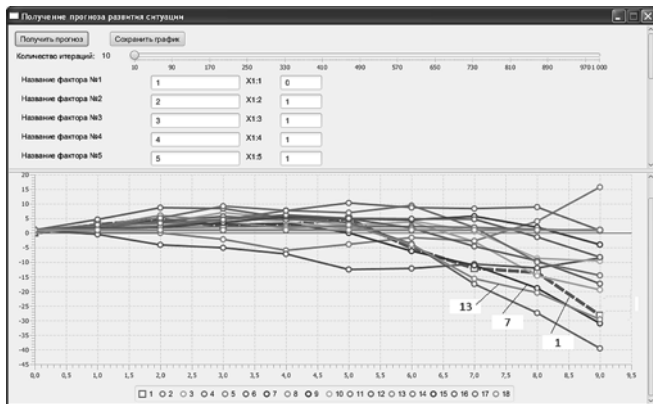


Рис. 3. Результат имитационного эксперимента с использованием исходной матрицы

интегральный показатель, характеризующий функционирование экономической системы, представляется совокупностью трех ее характеристик, исследованных ранее по отдельности [7].

Далее проводится имитационный эксперимент с использованием авторского программного средства для исследования устойчивости структуры сформированного детализированного образа обобщенной характеристики экономической системы [8]. Суть имитационного эксперимента состоит в том, что в одну или несколько управляющих вершин созданной структуры в виде орграфа вводятся возмущения, которые распространяются по различным его путям и оказывают суммарное воздействие на другие вершины, в том числе целевые: конкурентоспособность (v_1), лояльность клиентов (v_7), прибыль (v_{13}). Имитационный эксперимент проводился несколько раз для получения вариантов, которые устраивали бы лицо, принимающее решения.

Один из вариантов, когда во все управляющие вершины внесены возмущения по одной условной единице, представлен на рис. 3.

Из рис. 3 видна тенденция уменьшения значений всех трех целевых факторов — "прибыли" (13), "лояльности клиентов" (7), "конкурентоспособности" (1) — на нескольких шагах вычислительной процедуры.

Далее детализированный образ обобщенной характеристики экономической системы третьего уровня иерархии исследовался с использованием симплициального анализа.

Симплициальный анализ детализированной модели

Симплициальный анализ является одним из важнейших этапов исследования, так как

позволяет выявлять неочевидные взаимосвязи факторов в системе в целях принятия адекватных решений о способах ее управления. Симплициальный анализ оперирует понятиями симплекса и комплекса, для построения которых используется структура системы в виде орграфа $G = (V, E)$, $V = (v_i, v_j)$, $E = (e_{ij})$, $i, j = 1, 2, \dots, n$. Множество вершин в нашем примере v_i , относящихся к конкретной вершине v_j орграфа $G_{об}$, трактуется как симплекс $\sigma_q^{(i)}$, где i — номер вершины, q — число дуг, на единицу меньших числа элементов в соответствующей строке (столбце) матрицы инцидентности. Симплициальный анализ, или анализ q -связности, использует понятие "цепь связи", которое означает, что два симплекса могут быть связаны, в том числе путем последовательности промежуточных симплексов. Совокупность симплексов, соединенных посредством общих граней, образует симплициальный комплекс $K_x(Y, R)$ или $K_y(X, R)$ [9].

Последовательность действий аналитика по реализации симплициального анализа такова. Формируется матрица инцидентности (рис. 4). Подсчитывается число единиц в каждой i -й строке и в каждом j -м столбце матрицы. Вычисляются размерности комплексов $K_x(Y, R)$ и $K_y(X, R)$. Записываются значения структурных векторов комплексов $Q_x = \{Q_{\dim K}, \dots, Q_1, Q_0\}$ и $Q_y = \{Q_{\dim K}, \dots, Q_1, Q_0\}$. Далее в два варианта преобразуется структура исходной матрицы путем упорядочения строк сверху вниз или упорядочения столбцов слева направо в соответствии с правилами убывания размерности: $q_1^i > q_2^i > q_3^i > \dots > 0 > -1$ и $q_1^j > q_2^j > q_3^j > \dots > 0 > -1$.

На рис. 4 первым элементом исходной матрицы является целевой фактор "конкурентоспособность", седьмым — "лояльность клиентов", тринадцатым — "прибыль".

Реализация симплициального анализа рассматривается на примере комплекса $K_y(X, R)$,

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1				1		1	1						1					
2	1			1														
3				1	1	1												
4					1													
5	1					1												
6	1			1			1						1					
7	1			1					1		1	1						
8	1										1							
9	1			1					1	1		1						
10						1						1						
11	1			1		1						1						
12											1							
13			1						1				1			1		
14												1		1	1			
15						1											1	
16																	1	
17						1						1	1					
18												1	1		1	1		
	6	-1	0	6	0	5	2	-1	2	1	2	7	2	0	2	2	-1	

Рис. 4. Исходная матрица инцидентности

который имеет восемнадцать симплексов с разной связностью. Анализ начинается с наибольшей связности и заканчивается связностью, равной нулю. По столбцам матрицы инцидентности определяется наибольшая связность. Для этого находим столбец с наибольшим числом элементов — это тринадцатый столбец, содержащий восемь единиц (рис. 4). Наибольшая связность комплекса $q = 8 - 1 = 7$. На этом уровне связности имеется одна компонента $\{x_{13}\}$. Понижаем уровень связности на единицу. На уровне связности $q = 6$ имеются две компоненты $\{x_{13}\}, \{x_1, x_4\}$. Далее последовательно понижаем уровень связности на единицу, включая уровень связности, равной нулю, каждый раз проверяя условие объединения [10].

Результаты вычислительной процедуры для комплекса $K_y(X, R)$:

$$q = 7, Q_7 = 1, \{x_{13}\};$$

$$q = 6, Q_6 = 2, \{x_{13}\}\{x_1, x_4\};$$

$$q = 5, Q_5 = 3, \{x_{13}\}\{x_1, x_4\}\{x_6\};$$

$$q = 4, Q_4 = 3, \{x_{13}\}\{x_1, x_4\}\{x_6\};$$

$$q = 3, Q_3 = 3, \{x_{13}\}\{x_1, x_4\}\{x_6\};$$

$$q = 2, Q_2 = 2, \{x_{13}, x_1, x_2, x_4, x_7, x_{10}, x_{12}\}\{x_6\};$$

$$q = 1, Q_1 = 1, \{все\};$$

$$q = 0, Q_0 = 1, \{все\}.$$

Вид структурного вектора $Q_y = \{1, 2, 3, 3, 3, 2, 1, 1\}$ показывает, что комплекс связан для большого и малых значений q , а для промежуточных значений он распадается на несколько несвязных компонент.

В результате симплицеального анализа выявлено, что наибольшее значение для исследуемой системы играют вершины x_{13} — целевой фактор "прибыль", x_1 — целевой фактор

"конкурентоспособность" и x_4 — управляющий фактор "спрос". Поэтому исходную матрицу взаимовлияния факторов можно преобразовать путем упорядочения ее столбцов в соответствии с правилом $q_1^j > q_2^j > q_3^j > \dots > 0 > -1$. В преобразованной матрице первым элементом будет фактор x_{13} , вторым — x_1 , третьим — x_4 и т.д.

Затем с использованием преобразованной матрицы проводится имитационный эксперимент, результат которого представлен на рис. 5.

Имитационный эксперимент показал хорошую результативность аналитических процедур, примененных для выявления неочевидных связей между факторами и получения преобразованной матрицы, так как с ее использованием наблюдается тенденция увеличения значений всех целевых факторов: 1 — прибыли, 2 — конкурентоспособности, 5 — лояльности клиентов на том же числе шагов вычислений, что и прежде, но с позитивным эффектом.

Таким образом, аналитические процедуры симплицеального анализа позволили получить вариант, который полностью устроил лицо, принимающее решения.

Заключение

В результате работы создана и исследована иерархическая модель интегральной характеристики экономической системы, представленной в виде конформируемого образа: то в сжатом, то в развернутом виде. Сформированная модель позволяет исследовать экономические характеристики с применением разнообразных средств анализа информации. В результате симплицеального анализа выявлено, что на втором уровне связности появляется первый связный компонент, который показывает, что при внесении изменений в управляющий фактор "спрос" целевой фактор "конкурентоспособность" немедленно отреагирует на эти воздействия. Предлагаемая модель может быть использована для формирования рекомендаций по улучшению эффективности деятельности экономической системы в целом.

Список литературы

1. Ильин В. П. Математическое моделирование. Часть 1. Непрерывные и дискретные модели. Новосибирск: СО РАН, 2017. 429 с.
2. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.

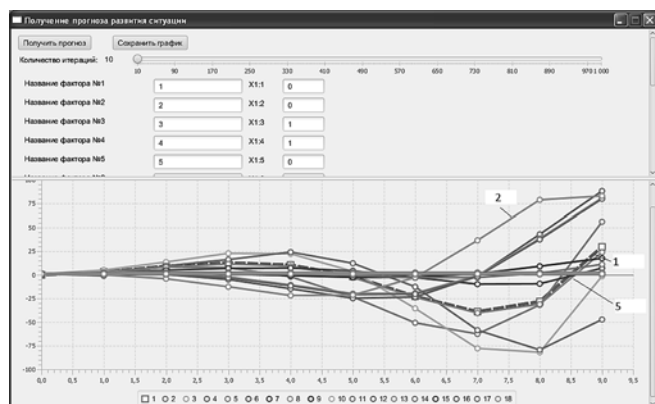


Рис. 5. Результат имитационного эксперимента с использованием преобразованной матрицы

3. Павлов К. В. Ядро экономической системы на разных уровнях управленческой иерархии // Socio-economic problem of management. Collective monograph. Melbourne, Australia, 2015. С. 53–68.

4. Мишин С. П. Оптимальные иерархии управления в экономических системах // Экономика и математические методы. 2007. Т. 43. № 3, С. 85–101.

5. Моностырская Е. Е. Иерархия факторов, мотивирующих деятельность человека в социально-экономической системе // Вестник науки Сибири. 2013. № 1 (7). С. 213–219.

6. Жуковская Л. В. Регулирование сложных социально-экономических систем на разных уровнях иерархии в условиях неопределенности // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2018. Т. 68, № 4, С. 17–25.

7. Суходолов А. П., Маренко В. А. Системный анализ, моделирование. Математическое моделирование. Иркутск: Изд-во БГУ, 2018. 144 с.

8. Ложников В. Е., Маренко В. А. Программная система "Синтез топологической структуры когнитивной модели". Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019617163 от 04.06.2019.

9. Береза О. А. Симплициальный анализ когнитивных карт социально-экономических систем // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 11 (124). С. 151–161.

10. Маренко В. А. Симплициальный анализ когнитивной структуры // Актуальные проблемы преподавания математики в техническом вузе. 2019. № 7. С. 199–207.

V. A. Marenko, Ph.D., Assistant Professor, e-mail: marenko@ofim.oscsbras.ru
Sobolev Institute of Mathematics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Omsk, 644099, Russian Federation

The Economic System Model as the Conformable Image of Analyst Reasoning

Description of the hierarchical model of the characteristics of the economic system is the goal. The model is made by taxonomic principle. The hierarchy of models on the example of indicators of profit, competitiveness and customer loyalty is shown. A stratified description of the object of study is the result. To study the model, simplicial analysis was used. Simulation experiments conducted. A comparison of the results before and after simplicial analysis is done.

Keywords: model, hierarchy, system, graph, simplicial analysis, simulation experiment

Acknowledgement: The work was supported by the program of fundamental scientific researches of the SB RAS № I.5.1., project № 0314-2019-0020"

DOI: 10.17587/it.26.419-423

References

1. Илин В. П. Mathematical modeling. Part 1. Continuous and discrete models, Novosibirsk, SB RAS, 2017, 429 p. (in Russian).

2. Mesarovich M., Mako D., Takahara I. Theory of hierarchical multilevel systems, Moscow, Mir, 1973, 344 p. (in Russian).

3. Pavlov K. V. 2.1. The core of the economic system at different levels of the management hierarchy, *Socio-economic problem of management*, Melbourne, Australia, 2015, pp. 53–68 (in Russian).

4. Mishin S. P. Optimal hierarchies of management in economic systems. *Ekonomika i Matematicheskiye Metody*, 2007, vol. 43, no. 3, pp. 85–101 (in Russian).

5. Monastyrskaya E. E. Hierarchy of factors motivating human activity in the socio-economic system, *Vestnik Nauki Sibiri*. 2013, no. 1 (7), pp. 213–219 (in Russian).

6. Zhukovskaya L. V. Regulation of complex socio-economic systems at different levels of the hierarchy in the face of uncertainty, *Trudy Instituta Sistemnogo Analiza Rossiyskoy Akademii Nauk*, 2018, vol. 68, no. 4, pp. 17–25 (in Russian).

7. Sukhodolov A. P., Marenko V. A. *System analysis, modeling. Mathematical modeling*, Irkutsk, BSU, 2018, 144 p.

8. Lozhnikov V. E., Marenko V. A. Program system "Synthesis of the topological structure of the cognitive model", Certificate of state registration of computer programs no. 2019617163 date 04.06.2019 (in Russian).

9. Bereza O. A. Simplicial analysis of cognitive maps of socio-economic systems, *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki*. 2011, no. 11 (124), pp. 151–161. (in Russian).

10. Marenko V. A. Simplicial analysis of cognitive structure. *Aktual'nyye problemy Prepodavaniya Matematiki v Tekhnicheskoy VUZe*, 2019, no. 7, pp. 199–207 (in Russian).

В. В. Семенов, мл. науч. сотр., e-mail: v.semenov@iias.spb.su,
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук

Мониторинг информационной безопасности беспилотных транспортных средств с использованием цифрового акселерометра

Рассматривается задача определения состояния информационной безопасности беспилотного транспортного средства внешней системой мониторинга. Эффективность решения задачи оценивается общей точностью классификации состояний объекта. Предлагается метод, основанный на анализе и классификации спектральных данных, регистрируемых с помощью цифрового трехосевого акселерометра, установленного на борту транспортного средства. Проведен эксперимент, направленный на исследование предложенного метода. В результате эксперимента показана принципиальная возможность использования данного побочного канала информации для использования в системах мониторинга информационной безопасности. Общая точность выбранного классификатора на основе алгоритма k -NN составила 0,82.

Ключевые слова: информационная безопасность, беспилотные транспортные средства, системы мониторинга информационной безопасности, побочные каналы, акселерометр, обработка многомерных данных

Введение

Современное развитие систем управления транспортом характеризуется внедрением и все более частым применением беспилотных транспортных средств (летающих объектов, автомобилей, поездов) для решения широкого круга задач [1]. Одним из направлений исследований и развития этой области является совершенствование теории и практики управления, контроля и использования беспилотных транспортных средств (БТС), способных самостоятельно с применением средств искусственного интеллекта решать отдельные задачи.

Подобный подход предусматривает децентрализованное управление транспортным средством, которое может осуществляться как с пульта управления, так и по заранее заданному алгоритму — автономно, что вызывает необходимость осуществления ряда мер, направленных на обеспечение информационной безопасности. Такие решения должны быть защищены от преднамеренных и непреднамеренных деструктивных воздействий, что вызывает необходимость внедрения не только систем защиты, но и систем мониторинга состояния. Классические подходы к защите информации, выражающиеся в противодействии несанкционированному доступу к данным, полностью не гарантируют достижения безопасного состояния.

В связи с вышесказанным возникает необходимость разработки моделей и методов мониторинга информационной безопасности (ИБ), использующих дополнительные источники, обеспечивающие независимый анализ состояния удаленных БТС.

1. Постановка задачи

Эффективность решений в области ИБ устройств, находящихся вне контролируемой зоны, связана с развитием научно-методического аппарата, предназначенного для повышения качественных показателей идентификации состояния защищенности. Защита киберфизических систем управления транспортом от атак является важной, но сложной задачей [2, 3]. Для ее решения необходима разработка моделей и методов мониторинга информационной безопасности автономных вычислительных средств [4, 5], учитывающих особенности киберфизических систем [6].

Одним из источников, позволяющих осуществлять анализ состояния ИБ, являются побочные каналы. В работе [7] приведен обзор некоторых методов определения аномального функционирования устройств с использованием информации побочных каналов. Выбор побочного канала зависит от конкретных при-

кладных задач и типа внешней системы мониторинга [8]. Широко применяются на практике побочные электромагнитные излучения и наводки [9, 10], видимое излучение, акустический канал [11] и др.

В работах [12, 13] применительно к системам защиты и мониторинга ИБ рассматривались решения, позволяющие проводить в основном бинарную классификацию, определяющую опасные и безопасные состояния. Однако в ряде случаев для оперативного реагирования на инцидент важно знать не только факт деструктивного воздействия, но и время начала вмешательства [14], а также подробности поведения контролируемого объекта. В случае с БТС это должны быть как конкретные координаты, так и значения параметров ускорения во время выполнения поставленных задач.

Таким образом, поставлена задача разработки метода мониторинга ИБ БТС, позволяющего осуществлять внешний независимый анализ состояния и отличающегося от известных, использующих классификацию, применением специализированного признакового пространства, которое базируется на совокупности оцифрованных последовательностей проекций ускорения и спектральных характеристиках.

Описать состояние исследуемого объекта можно с использованием в качестве источника полезной информации внешних каналов [15]. Предлагается модель профиля, описывающая состояние БТС на основе данных акселерометра с помощью последовательности проекций ускорения после дискретизации сигнала по времени:

$$\psi(t) = \begin{bmatrix} a_x(0) & a_x(1) & \dots & a_x(m) \\ a_y(0) & a_y(1) & \dots & a_y(m) \\ a_z(0) & a_z(1) & \dots & a_z(m) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $a_x(t)$, $a_y(t)$, $a_z(t)$ — проекции ускорения на соответствующую ось в момент времени t .

В случае использования спектрального преобразования кортеж (1) приобретает вид:

$$\Psi(f) = \begin{bmatrix} I_x(0) & I_x(1) & \dots & I_x(m) \\ I_y(0) & I_y(1) & \dots & I_y(m) \\ I_z(0) & I_z(1) & \dots & I_z(m) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $I(f)$ — значение спектральной интенсивности на частоте f .

Мониторинг состояния информационно-безопасности становится возможным после применения различных классификаторов и методов

машинного обучения к информации (2), полученной с датчиков. Отклонение от нормального состояния отражается во внезапном изменении трасс сигналов. Измененный вход спектра приведет к тому, что соответствующий ему вектор скрытого состояния отойдет от ожидаемого вектора в пространстве состояний.

2. Предлагаемый метод

Предлагаемый метод основан на модели профиля исследуемых объектов и позволяет определить отклонения от безопасного функционирования БТС в целях дальнейшего реагирования на выявленные инциденты. Стоит отметить, что применяя данный метод, нельзя однозначно судить о типе воздействия и о его преднамеренном или непреднамеренном характере. Нахождение устройства под атакой или иное непреднамеренное воздействие вызывает различные аномалии во внутренних вычислительных процессах объекта, что влечет за собой изменение потребляемой мощности, параметров побочного излучения, увеличение времени задержек и т.д. Целью злоумышленника может являться получение как полного, так и частичного (эпизодического) контроля над атакуемым устройством. Такая атака может, в частности, проявляться при использовании злоумышленником атакующего устройства, способного выдавать свои управляющие команды за команды легального пользователя, или (в случае автономной эксплуатации) при внесении злоумышленником деструктивных изменений в рабочую программу движения БТС. На рис. 1 схематично представлен предлагаемый метод.

Первой стадией является обучение, в результате которого выявляются текущие параметры

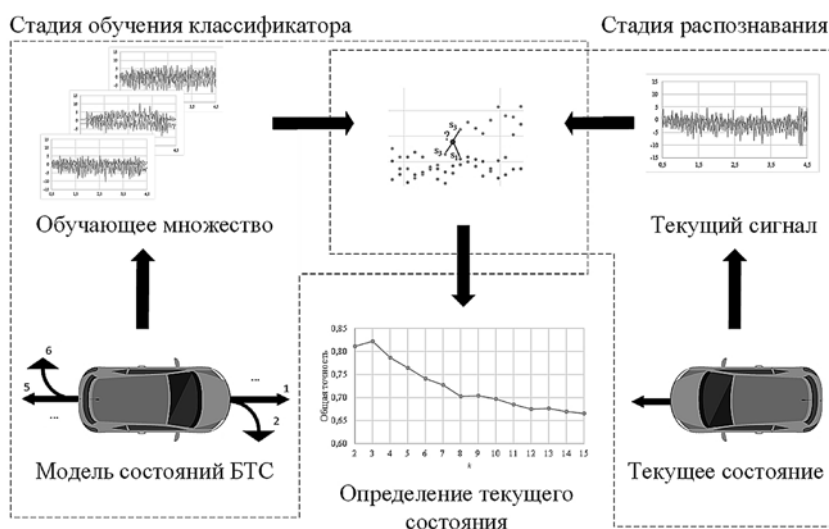


Рис. 1. Метод мониторинга состояний БТС

ускорения, описывающие состояние объекта. Обучение проводится на заранее определенных последовательностях, отражающих поведение объекта в известных состояниях. Накопленные статистические данные в дальнейшем позволяют определить критерии, на основе которых возможно реализовывать классификаторы для обнаружения аномалий.

В результате деструктивного воздействия происходят изменения выполнения управляющих последовательностей. Классифицируя спектры проекций ускорения различных состояний, можно идентифицировать аномальные состояния.

Для классификации был использован алгоритм k -NN (k ближайших соседей), реализованный в среде MATLAB R2019b. Достоинствами метода классификации состояний с использованием алгоритма k -NN являются простота и отсутствие фазы обучения, классификация проводится непосредственно в процессе применения модели над обучающим множеством и исследуемым процессом. Алгоритм [16] классифицирует все доступные точки спектра по показателям их сходства. В качестве метрики для определения сходства между двумя точками спектра можно использовать евклидово расстояние:

$$d(p, q) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (p_k - q_k)^2}. \quad (3)$$

Для каждой точки спектральных данных вычисляются расстояния (3) до других доступных точек, выбираются ближайшие k соседей и для каждого класса вычисляются условные вероятности. Точка данных будет принадлежать классу с наибольшей условной вероятностью. k является гиперпараметром модели и должен быть установлен до проведения классификации. Путем варьирования данного гиперпараметра можно определить его оптимальное значение для исследуемого набора данных. На этапе оптимизации используемого алгоритма при фиксированном k с использованием обучающей выборки евклидово расстояние показало наибольшие значения точности.

3. Эксперимент

Анализ возможностей мониторинга состояния объекта проводился на основе данных эксперимента, в котором БТС подвергалось внешнему воздействию при выполнении различных маневров. Предварительный этап эксперимента состоял в обучении внешней контролирующей системы на основе характеристик сигналов, снимаемых с помощью аксе-

лерометра, установленного на борту БТС, при выполнении маневров. Каждый маневр повторялся пять раз для накопления достоверной статистической информации. Схема эксперимента представлена на рис. 2.

Измерения линейного ускорения БТС выполнены с помощью цифрового трехосевого акселерометра BMC150 Acceleration Sensor фирмы Bosch Sensortec GmbH (Германия). Интервал между двумя последовательными измерениями 0,0096 с. Максимальное измеряемое прибором линейное ускорение 19,6133 м/с² (в пересчете на проекцию по любой из осей). Данные, полученные от измерительного устройства, регистрировались внешней контролирующей системой.

Определение пространственной ориентации БТС выполнялось относительно вектора гравитационного поля Земли g . Углы наклона измерялись, как показано на рис. 3.

Исходя из этого, величины проекций векторов ускорения a_x , a_y , a_z по осям x , y , z можно рассчитать по формулам

$$a_x = g \sin \theta \cos \varphi; \quad (4)$$

$$a_y = -g \sin \theta \sin \varphi; \quad (5)$$

$$a_z = g \cos \theta, \quad (6)$$

где g — модуль измеренного акселерометром ускорения.

Используемая конечная система координат показана на рис. 4. Начало координат нахо-

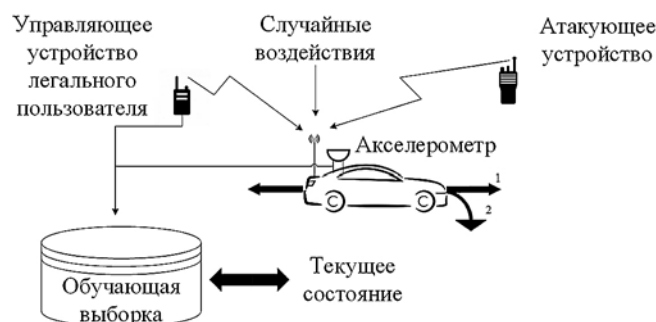


Рис. 2. Схема эксперимента

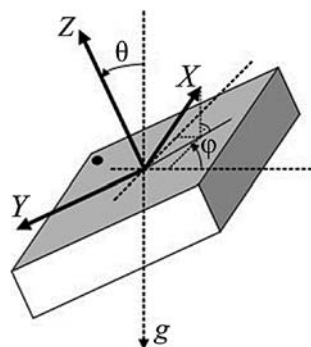


Рис. 3. Определение пространственной ориентации

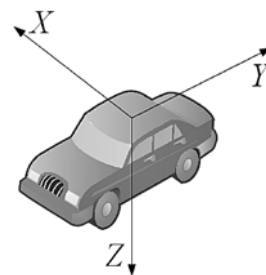


Рис. 4. Используемая конечная система координат относительно БТС

дится в верхней центральной точке БТС. Если БТС движется вперед, то ось Y будет направлена назад прямо, ось X — перпендикулярно вправо по направлению движения, а ось Z — вертикально вниз.

Проведен эксперимент, направленный на получение статистических портретов различных маневров объекта на основе данных статично установленного на борту цифрового акселерометра, фиксирующего ускорение БТС. По формулам (4)–(6) ускорение пересчитано в проекции по осям. Измеренные значения могут передаваться по беспроводной сети или обрабатываться непосредственно на самом контролирующем измерительном устройстве.

В ходе эксперимента испытуемое БТС совершало заданные с пульта управления маневры, относимые к безопасным (классы 1–3) — движение "вперед прямо", "вперед направо", "вперед налево" и к небезопасным (классы 4–6), когда в процессы функционирования моделировалось вмешательство злоумышленника — "движение прямо" с перехватом сигнала и периодическим внесением с пульта злоумышленника команд "направо", "налево", "назад". Каждый маневр повторялся шесть раз, данные фиксировались внешней системой. Показания акселерометра в состоянии останова транспортного средства также фиксировались, но не участвовали в общей классификации, поскольку данное состояние значительно отличается от других (рис. 5) определяется с точностью 0,99.

В состоянии останова наличие смещения значений проекций линейного ускорения по осям X и Y относительно нуля свидетельствует о расположении датчика под углом. Поскольку модель определяет отклонения от нормального состояния, обнаружение аномального функционирования возможно при любом начальном расположении датчика, главным условием является лишь его статичное расположение в период накопления обучающей выборки и классификации состояния ИБ. В случае смены пространственного расположения датчика исходя из архитектуры конкретного (одного и того же) устройства возможен перенос зависимостей.

На рис. 6 представлен график проекций ускорения по трем осям для случая движение "вперед прямо".

Поскольку ось Z направлена вертикально вверх, а эксперимент проводился на ровной поверхности (без изменения уровня высоты), то на проекцию a_z ускорения на ось Z самое большое влияние всегда будет оказывать величина ускорения свободного падения g . В дальнейшем, с учетом указанных ограничений эксперимента, будем считать, что a_z для исследуемого

БТС не несет полезной информации и для наглядности уберем a_z из последующих графиков.

На рис. 7 представлен график проекций ускорения по двум осям для случая движение "вперед направо". По сравнению с графиком для случая 1 (см. рис. 6) наблюдается четко выраженное увеличение проекции ускорения на ось X (ось направлена вправо по направлению движения).

В случае движения "вперед налево" наблюдается закономерное снижение проекции ускорения на ось X . Для других случаев (состояния 3–6) также явно прослеживается прямая зависимость величин проекций ускорения по осям от совершаемых маневров.

Недостатком применения зависимостей линейного ускорения от времени для целей проведения идентификации состояния ИБ является необходимость четкого посекундного совмещения времени начала маневра с тем, которое имеется в обучающей выборке. Для устранения этого недостатка был проведен повтор-

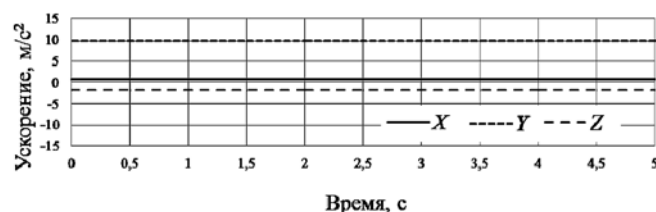


Рис. 5. График проекций ускорения для состояния останова

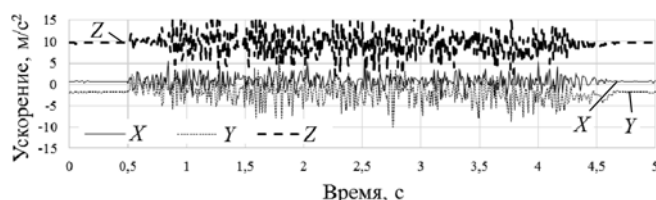


Рис. 6. График проекций ускорения для состояния 1 — "движение прямо"

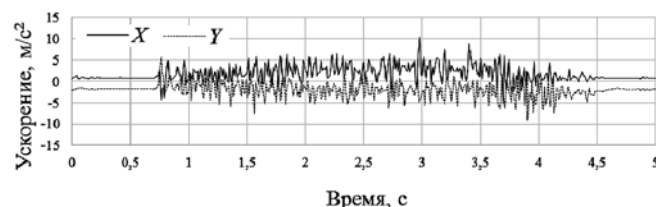


Рис. 7. График проекций ускорения для состояния 2 — "вперед направо"

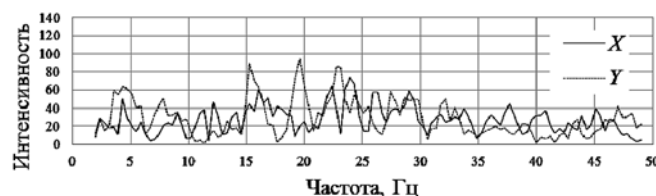


Рис. 8. График спектра ускорения для состояния 1 — "движение прямо"

ный эксперимент с цифровым акселерометром в режиме спектрометра. Для этого к полученным данным был применен алгоритм быстрого преобразования Фурье (FFT). Диапазон частот преобразования Фурье выбирался на основе частоты дискретизации устройства. Для примера приведен график спектра одного из состояний БТС (рис. 8).

4. Результаты эксперимента

Проводилась классификация спектров различных состояний с помощью метода *k* ближайших соседей (*k*-NN). В целях оптимизации классификатора имеющийся массив спектральных данных был последовательно проклассифицирован при разных значениях гиперпараметра модели *k* = {2, 3, ..., 15} (рис. 9).

Таким образом, наилучшая точность предложенного классификатора наблюдается при *k* = 3 и уменьшается с увеличением *k*. В таблице представлены результаты классификации состояния ИБ методом *k*-NN (при *k* = 3) по шести классам (состояния 1–6).

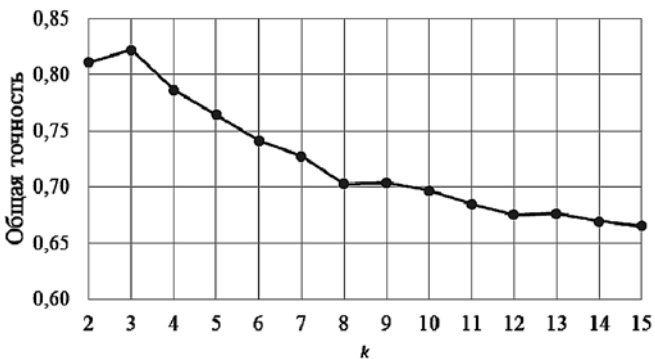


Рис. 9. Зависимость общей точности (overall accuracy) от числа соседних точек (*k*)

Результаты классификации ИБ методом *k*-NN (*k* = 3)

Истинный класс	Расчетный класс					
	1	2	3	4	5	6
1	109 (90,08 %)	0 (0 %)	5 (4,13 %)	1 (0,83 %)	3 (2,48 %)	3 (2,48 %)
2	3 (2,48 %)	117 (96,69 %)	1 (0,83 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
3	7 (5,79 %)	2 (1,65 %)	108 (89,26 %)	1 (0,83 %)	1 (0,83 %)	2 (1,65 %)
4	4 (3,31 %)	1 (0,83 %)	4 (3,31 %)	104 (85,95 %)	6 (4,96 %)	2 (1,65 %)
5	16 (13,22 %)	3 (2,48 %)	10 (8,26 %)	10 (8,26 %)	77 (63,64 %)	5 (4,13 %)
6	15 (12,40 %)	2 (1,65 %)	11 (9,09 %)	6 (4,96 %)	5 (4,13 %)	82 (67,77 %)

Общая точность выбранного классификатора для случая полной классификации составила 0,82. Отдельные классы (состояния 1 и 2) классификатор способен различить с точностью выше 0,9. В то же время наблюдается снижение точности отнесения для отдельных классов (5 и 6), обусловленное сложностью статистического портрета маневров (например, движение вперед-назад). В перспективе с использованием предложенного метода можно значительно повысить точность классификации, применив модель сегментации, описанную авторами в работе [17]. Постоянно сохраняя и обновляя данные о местоположении БТС, можно исключить из рассмотрения маневры, которые невозможны в данный момент времени, и осуществлять классификацию над ограниченным (сегментированным) набором.

Заключение

Показано, что на основе данных внешней контролирующей системы, фиксирующей в режиме реального времени изменение ускорений, возможно с высокой точностью идентифицировать выполняемые БТС маневры, которые в свою очередь зависят от исполняемых на борту информационных процессов и надежности канала связи. В ходе эксперимента общая точность идентификации маневров БТС на основе спектральных данных измерительной системы, составила 0,82.

Достоинствами данного метода является возможность быстрой адаптации моделей состояния, применение различного математического аппарата и методов машинного обучения для получения заданной точности вероятностной оценки. Дальнейшие исследования в данной области могут быть связаны с повышением общей точности идентификации состояний, в частности, путем применения модели сегментации состояний.

Таким образом, предложенный метод является как новой альтернативой, так и дополнением к существующим программным и программно-аппаратным средствам защиты информации и может использоваться для мониторинга ИБ автономных беспилотных объектов. При необходимости и соответствующей настройке контролирующая система может блокировать небезопасные состояния БТС в режиме реального времени.

Список литературы

1. Semenov V. V., Sukhoparov M. E., Lebedev I. S. Approach to Side Channel-Based Cybersecurity Monitoring for

Autonomous Unmanned Objects // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2019. Vol. 11659. P. 278–286. DOI: 10.1007/978-3-030-26118-4_27.

2. Wang M., Huang K., Wang Y., Wu Z., Du Z. A novel side-channel analysis for physical-domain security in cyber-physical systems // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2019. Vol. 15 (8). DOI: 10.1177/1550147719867866.

3. Devesh M., Kant A. K., Suchit Y. R., Tanuja P., Kumar S. N. Fruition of CPS and IoT in Context of Industry 4.0 // Choudhury S., Mishra R., Mishra R., Kumar A. (eds) Intelligent Communication, Control and Devices. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 989. P. 367–375. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-13-8618-3_39.

4. Buldakova T. I. Cybersecurity Risks Analyses at Remote Monitoring of Object's State // Kravets A., Bolshakov A., Shcherbakov M. (eds) Cyber-Physical Systems: Industry 4.0 Challenges. Studies in Systems, Decision and Control. 2020. Vol. 260. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-32648-7_15.

5. Семенов В. В., Лебедев И. С. Обработка сигнальной информации в задачах мониторинга информационной безопасности автономных объектов беспилотных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 3. С. 492–498. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-492-498.

6. Faruque M. A., Regazzoni F., Pajic M. Design methodologies for securing cyber-physical systems // Proceedings of the 2015 international conference on hardware/software codesign and system synthesis (CODES + ISSS), Amsterdam, 4–9 October 2015. New York: IEEE. DOI: 10.1109/CODESISSS.2015.7331365.

7. Spatz D., Smarra D., Ternovskiy I. A review of anomaly detection techniques leveraging side-channel emissions // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2019. Vol. 11011 DOI: 10.1117/12.2521450.

8. Семенов В. В., Лебедев И. С., Сухопаров М. Е. Идентификация состояния информационной безопасности беспилотных транспортных средств с использованием искусственных нейронных сетей // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации: Матер. 28-й науч.-техн. конф. 24–27 июня 2019 г. 2019. № 28. С. 46–47.

9. Han Y., Etigowni S., Liu H., Zonouz S., Petropulu A. Watch Me, but Don't Touch Me! Contactless Control Flow Monitoring via Electromagnetic Emanations // Proceedings of the ACM Conference on Computer and Communications Security. 2017. P. 1095–1108.

10. Yilmaz B., Prvulovic M., Zajic A. Electromagnetic Side Channel Information Leakage Created by Execution of Series of Instructions in a Computer Processor // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 2020. Vol. 15. P. 776–789. DOI: 10.1109/TIFS.2019.2929018.

11. De Souza Faria G., Kim H. Y. Differential audio analysis: a new side-channel attack on PIN pads // International Journal of Information Security. 2019. Vol. 18 (1), P. 73–84. DOI: 10.1007/s10207-018-0403-7.

12. Семенов В. В., Лебедев И. С., Сухопаров М. Е. Идентификация состояния отдельных элементов киберфизических систем на основе внешних поведенческих характеристик // Прикладная информатика. 2018. Т. 13. № 5 (77). С. 72–83.

13. Семенов В. В., Лебедев И. С., Сухопаров М. Е. Подход к классификации состояния информационной безопасности элементов киберфизических систем с использованием побочного электромагнитного излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18, № 1. С. 98–105. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-98-105.

14. Семенов В. В., Салахутдинова К. И., Лебедев И. С., Сухопаров М. Е. Выявление аномальных отклонений при функционировании устройств киберфизических систем // Прикладная информатика. 2019. Т. 14, № 6 (84). С. 114–122. DOI: 10.24411/1993-8314-2019-10053.

15. Spatz D., Smarra D., Ternovskiy I. A review of anomaly detection techniques leveraging side-channel emissions // Proc. SPIE 11011, Cyber Sensing. 2019. DOI: 10.1117/12.2521450.

16. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning // Information Science and Statistics, Springer, NY, USA. 2006.

17. Semenov V. V., Lebedev I. S., Sukhoparov M. E., Salakhutdinova K. I. Application of an Autonomous Object Behavior Model to Classify the Cybersecurity State // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2019. Vol. 11660. P. 104–112. DOI: 10.1007/978-3-030-30859-9_9.

V. V. Semenov, Junior Scientific Researcher, e-mail: v.semenov@iiias.spb.su,
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, Russian Federation

Monitoring of the Information Security State of Unmanned Vehicles by Using Digital Accelerometer

The problem of determining the information security state of an unmanned vehicle by an external monitoring system was considered. The effectiveness of solving this problem is estimated by the overall accuracy of the classification of the state of the object. A method based on the analysis and classification of spectral data recorded by a digital three-axis accelerometer mounted on board a vehicle was proposed. An experiment aimed at studying the proposed method was described. As a result of the experiment, the fundamental possibility of using accelerometer in information security monitoring systems is shown. The overall accuracy of the selected classifier based on the k-NN algorithm was 0.82.

Keywords: information security, unmanned vehicles, information security monitoring systems, side channels, accelerometer, multivariate data processing

DOI: 10.17587/it.26.424-430

References

1. Semenov V. V., Sukhoparov M. E., Lebedev I. S. Approach to Side Channel-Based Cybersecurity Monitoring for Autonomous Unmanned Objects, *Lecture Notes in Computer Science*

(including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2019, vol. 11659, pp. 278–286. DOI: 10.1007/978-3-030-26118-4_27.

2. Wang M., Huang K., Wang Y., Wu Z., Du Z. A novel side-channel analysis for physical-domain security in cyber-physical

systems, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2019, vol. 15 (8). DOI: 10.1177/1550147719867866.

3. **Devesh M., Kant A. K., Suchit Y. R., Tanuja P., Kumar S. N.** Fruition of CPS and IoT in Context of Industry 4.0, Choudhury S., Mishra R., Mishra R., Kumar A. (eds), *Intelligent Communication, Control and Devices. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 989, pp. 367–375. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-13-8618-3_39.

4. **Buldakova T. I.** Cybersecurity Risks Analyses at Remote Monitoring of Object's State, Kravets A., Bolshakov A., Shcherbakov M. (eds), *Cyber-Physical Systems: Industry 4.0 Challenges. Studies in Systems, Decision and Control*, 2020, vol. 260. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-32648-7_15.

5. **Semenov V. V., Lebedev I. S.** Processing of signal information in problems of monitoring information security of unmanned autonomous objects, *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 492–498 (in Russian). DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-492-498.

6. **Faruque M. A., Regazzoni F., Pajic M.** Design methodologies for securing cyber-physical systems, *Proceedings of the 2015 international conference on hardware/software codesign and system synthesis (CODES + ISSS), Amsterdam, 4–9 October 2015*, New York, IEEE, DOI: 10.1109/CODESISSS.2015.7331365.

7. **Spatz D., Smarra D., Ternovskiy I.** A review of anomaly detection techniques leveraging side-channel emissions, *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*, 2019, vol. 11011, DOI: 10.1117/12.2521450.

8. **Semenov V. V., Lebedev I. S., Sukhoparov M. E.** Identification of the information security state of unmanned vehicles using artificial neural networks, *Proceedings of the 28th Technical Science Conference "Methods and technical means of ensuring the security of information". June 24–27, 2019 St. Petersburg. Publisher Polytechnic University*, 2019, pp. 46–47 (in Russian).

9. **Han Y., Etigowni S., Liu H., Zonouz S., Petropulu A.** Watch Me, but Don't Touch Me! Contactless Control Flow Monitoring via Electromagnetic Emanations, *Proceedings of the ACM Conference on Computer and Communications Security*, 2017, pp. 1095–1108.

10. **Yilmaz B., Prvulovic M., Zajic A.** Electromagnetic Side Channel Information Leakage Created by Execution of Series of Instructions in a Computer Processor, *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2020, vol. 15, pp. 776–789, DOI: 10.1109/TIFS.2019.2929018.

11. **De Souza Faria G., Kim H. Y.** Differential audio analysis: a new side-channel attack on PIN pads, *International Journal of Information Security*, 2019, vol. 18 (1), pp. 73–84. DOI: 10.1007/s10207-018-0403-7.

12. **Semenov V., Lebedev I., Sukhoparov M.** Identification of the state of individual elements of cyber-physical systems based on external behavioral characteristics, *Prikladnaya informatika — Journal of Applied Informatics*, 2018, vol. 13, no. 5 (77), pp. 72–83 (in Russian).

13. **Semenov V., Lebedev I., Sukhoparov M.** Approach to classification of the information security state of elements for cyber-physical systems by applying side electromagnetic radiation, *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 98–105 (in Russian), DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-98-105.

14. **Semenov V. V., Salakhutdinova K. I., Lebedev I., Sukhoparov M.** Identification of abnormal functioning during the operation devices of cyber-physical systems, *Prikladnaya informatika — Journal of Applied Informatics*, 2019, vol. 14, no. 6(84), pp. 114–122 (in Russian), DOI: 10.24411/1993-8314-2019-10053.

15. **Spatz D., Smarra D., Ternovskiy I.** A review of anomaly detection techniques leveraging side-channel emissions, *Proc. SPIE 11011, Cyber Sensing*, 2019, DOI: 10.1117/12.2521450.

16. **Bishop C. M.** Pattern Recognition and Machine Learning, Information Science and Statistics, *Springer*, NY, USA, 2006.

17. **Semenov V. V., Lebedev I. S., Sukhoparov M. E., Salakhutdinova K. I.** Application of an Autonomous Object Behavior Model to Classify the Cybersecurity State, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2019, vol. 11660, pp. 104–112, DOI: 10.1007/978-3-030-30859-9_9.

УДК 004.051

DOI: 10.17587/it.26.430-440

Л. Е. Мистров, д-р техн. наук, проф., e-mail: mistrov_le@mail.ru,
Центральный филиал Российского государственного университета правосудия, г. Воронеж,
Е. В. Головченко, канд. техн. наук, ст. преп., e-mail: evvigo@mail.ru,
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", г. Воронеж

Методологические основы оценки устойчивости функционирования авиационной информационной системы

Показана взаимообусловленная связь между конфликтной устойчивостью авиационных организационно-технических систем и обеспечивающих их применение инфокоммуникационных сетей. Предложен новый показатель устойчивости функционирования авиационных инфокоммуникационных сетей, основанный на положениях теории вероятностей и позволяющий определить нижнюю оценку конфликтной устойчивости авиационных организационно-технических систем.

Ключевые слова: устойчивость функционирования, эффективность функционирования, авиационные инфокоммуникационные сети, риск, пропускная способность

Введение

В настоящее время развитие воздушного транспорта сдерживается множеством различ-

ных причин. Основные из них можно выразить в виде объективного противоречия: с одной стороны, увеличение объемов воздушных перевозок грузов и пассажиров необходимо

для поддержания экономического роста, с другой — неуправляемые темпы роста воздушного движения вызывают значительное снижение уровня авиационной безопасности. Особенно резко это снижение проявляется, когда темпы роста воздушного движения опережают темпы развития регулятивных процессов и соответствующей инфраструктуры [1].

Разрешение указанного противоречия основывается на обеспечении взаимодействия всех участников (сторон), задействованных в воздушных перевозках. Целью такого взаимодействия является достижение и поддержание требуемого уровня авиационной безопасности при одновременном выдерживании пропорциональных темпов роста в обоих направлениях. Наиболее перспективный из известных способов обеспечения такой взаимосвязи заключается в использовании целостных, корпоративных (совместных) процессов принятия решений, в рамках которых ожидания участников авиационного сообщества будут сбалансированы и направлены на достижение оптимальных результатов на основе справедливого обеспечения доступа к требуемым ресурсам [1].

В общем случае совокупность объектов, принимающих участие в воздушных перевозках, и связей между ними представляет функциональную организационно-техническую систему (ОТС), включающую:

- авиационные предприятия, которые непосредственно осуществляют воздушные перевозки пассажиров, багажа, грузов, почты или выполняют авиационные работы;
- оперативные органы Единой системы организации воздушного движения, основными задачами которой являются планирование и координирование использования воздушного пространства, а также организация воздушного движения;
- организации, осуществляющие непосредственное обслуживание воздушных судов от прилета до вылета;
- организации, осуществляющие обслуживание пассажиров, багажа, грузов, почты или выполнение авиационных работ.

Каждая из этих организаций, в свою очередь, является сложной ОТС с собственными целями, обладающей ресурсами, имеющей в своей структуре органы, принимающие решения, и элементы, реализующие основные функции.

На стадии эксплуатации рассматриваемой функциональной системы между авиационными предприятиями проявляются конфликтные отношения за право обладания ресурсами или первоочередного использования ресурсов, обеспечивающих ОТС в целях экономичного рас-

ходования собственных ресурсов и получения максимальной прибыли. Одним из наиболее перспективных способов обеспечения эффективности функционирования авиационных предприятий является использование эффективных траекторий полетов, включая полеты по произвольным, наиболее экономичным заранее заданным траекториям, а также горизонтальной эффективности на эшелоне, горизонтальной и вертикальной эффективности при снижении.

К наиболее важным задачам, решаемым в рамках рассматриваемой функциональной системы, относятся:

- управление процессами наземного обслуживания воздушных судов (ВС) от прилета до вылета и очередностью вылета;
- управление потоками ВС посредством диспетчерского обслуживания и синхронизации отдельных полетов;
- согласование прогнозов погоды для формирования ограничений на потоки движения в воздушном пространстве или по отдельным аэропортам;
- синхронизация и выбор динамических конфигураций воздушного пространства;
- определение критериев эффективности организации воздушного движения, адекватных к конкретным условиям обстановки;
- определение соразмерной односторонней реакции на произошедшие или ожидаемые события, когда временные ограничения не позволяют осуществлять дальнейшее сотрудничество в процессе реагирования на такие события.

Необходимым условием функционирования такой системы является наличие развитой системообразующей информационной инфраструктуры, а также информационных систем более высокого уровня интеграции и возможности сопряжения различных радиоэлектронных систем, обеспечивающих своевременное доведение информации до потребителей, минуя промежуточные звенья. Создание такой единой информационной инфраструктуры позволит обеспечить оперативность подготовки к выполнению задач по предназначению, адаптивное планирование применения сил и средств авиации и управление ими в реальном масштабе времени.

Существование устойчивых корпоративных решений, особенно в условиях наличия различного рода неопределенностей, без обмена информацией между всеми задействованными сторонами невозможно, поэтому необходимым условием достижения таких решений является устойчивое функционирование обеспечивающей информационной системы и ее способность предоставлять услуги с требуемым качеством.

Достижение заданного уровня конфликтной устойчивости функционирования авиационной ОТС (авиапредприятия) может быть обеспечено лишь при условии достижения соответствующего уровня устойчивости авиационной информационной системы. Основу последней составляет авиационная инфокоммуникационная сеть (АИС), обеспечивающая обмен информацией между элементами информационной системы и ее распределенную работу. Именно на элементы АИС непосредственно оказывают влияние различного рода деструктивные воздействия, снижая эффективность функционирования информационной системы и в целом авиационной ОТС. Обобщенная структура авиационной информационной системы, представленная на рис. 1 (см. третью сторону обложки), включает в себя информацию, хранящуюся в базах данных серверов, средства обработки информации должностными лицами органов управления авиационных основных и обеспечивающих ОТС, а также средства обмена информацией, обеспечивающих распределенную обработку информации удаленных органов управления и объединенных в авиационную АИС.

Таким образом, именно устойчивость АИС определяет устойчивость авиационной информационной системы и в общем случае создает базу для обеспечения конфликтной устойчивости соответствующей авиационной ОТС. Возникает необходимость оценки устойчивости функционирования информационной системы с точки зрения авиационной ОТС, при этом под оценкой устойчивости следует понимать и процесс оценки и непосредственно его результат. Важнейшим элементом такой оценки является обоснование показателя, который бы, с одной стороны, мог адекватно оценить степень воздействия дестабилизирующих факторов, а с другой — учесть их при оценке устойчивости авиационной ОТС. Следует отметить, что исходя из структуры информационной системы авиационной ОТС способность информационной системы обеспечивать распределенный режим работы в условиях воздействия дестабилизирующих факторов полностью определяется способностью АИС противостоять последним. Потому в основе оценки устойчивости функционирования авиационной информационной системы должны лежать показатели устойчивости АИС.

Таким образом, потребности практики актуализируют общую научную задачу разработки методологических основ оценки устойчивости функционирования авиационной информационной системы в виде частных задач обоснования показателей устойчивости функционирования авиационной информационной

системы и АИС, способных предоставлять услуги с заданным качеством при воздействии дестабилизирующих факторов.

Факторы, определяющие требования к показателям качества функционирования авиационных инфокоммуникационных сетей

Под *качеством АИС* понимается свойство или совокупность свойств, обуславливающих пригодность АИС для использования по назначению [2, 3]. Такими свойствами, например, могут быть число и характеристики узлов коммутации и каналов связи, особенности управления сетью и способы маршрутизации.

Качество функционирования АИС характеризует уже не саму сеть, а в целом процесс ее функционирования с учетом воздействия окружающей среды. Определяющими качеством функционирования свойствами могут быть продолжительность функционирования, ресурсоемкость и наиболее важное свойство — результативность, которая характеризует способность сети в процессе функционирования достигать поставленной цели.

Под *эффективностью АИС* понимается комплексное операционное свойство сети, характеризующее ее приспособленность к достижению цели функционирования [3], направленной на предоставление пользователям услуг связи требуемого качества, отражающее методы оценивания и получаемый результат.

Адекватность оценки, т. е. соответствие целям оценивания, во многом зависит от выбора показателя, его способности наиболее полно учитывать особенности построения, применения и функционирования АИС. Для достижения целей оценивания показатель должен иметь ясный физический смысл и отражать ее целевую направленность [4]. В то же время выбор показателя качества вытекает из принятых критериев оценки, позволяющих решать задачу соответствия АИС заданным требованиям [3].

Поэтому оценка качества функционирования АИС включает задачи выбора показателей качества функционирования АИС и комплексного показателя, характеризующего эффективность функционирования АИС, а также обоснование соответствующих им требований и критериев.

Оценка показателей качества АИС основывается на парировании учета особенностей.

Во-первых, функционирование АИС определяется конкретными ситуациями, связанными с управлением элементами авиационной ОТС при выполнении ею задач по предназна-

чению. Как правило, такие ситуации являются уникальными, поскольку полное их совпадение по месту, времени, задачам и целям — событие практически невозможное. Поэтому полученные статистические данные в одних условиях не всегда возможно адекватно использовать в других.

Во-вторых, специфика управления элементами авиационной ОТС характеризуется наибольшей нагрузкой на сети в критических ситуациях, связанных с высокой степенью неопределенности, вытекающей из случайного характера управляемого процесса и неоднозначности целей, альтернатив действий и их последствий.

В-третьих, решения, принимаемые органами управления авиационной ОТС, даже самые ответственные, принимаются в условиях довольно жесткого ограничения по времени.

Таким образом, динамичность и скоротечность процессов управления авиационными ОТС, высокая ответственность принимаемых решений ужесточают требования к адекватности показателей и точности результатов оценки качества функционирования АИС.

Анализ существующих показателей эффективности инфокоммуникационных сетей

В настоящее время для оценивания качества функционирования инфокоммуникационных сетей, в том числе и авиационных, используют различные показатели, учитывающие те или иные стороны процесса функционирования и свойства самой системы. В зависимости от целей оценивания показатели могут характеризовать процесс функционирования сети на физическом, канальном, сетевом или на транспортном уровнях эталонной модели взаимосвязи открытых систем (ЭМВОС). Ввиду того, что основные принципы функционирования инфокоммуникационных сетей на множестве условий применения одинаковы, исходя из необходимости расширения области анализа рассмотрим существующие показатели оценки качества функционирования инфокоммуникационных сетей общего назначения.

В работе [5] представлен показатель удельной содержательности сигнала, передаваемого по каналам связи ИС, в виде

$$\nu = \frac{I}{V},$$

где I — количество информации, содержащейся в передаваемом сообщении; V — объем сигнала.

В свою очередь, количество информации I и объем сигнала V определяются в виде

$$I = n \log_a m;$$

$$V = TFH,$$

где n — длина передаваемого сообщения; m — число элементов, образующих сообщение; a — основание кода; T — длительность передачи сообщения; F — ширина спектра сигнала, содержащего сообщение; H — отношение средних мощностей сигнал/шум.

При этом возможности каналов связи сети для передачи сообщений, характеризуемые емкостью канала V_k , должны быть достаточными для размещения передаваемого объема V :

$$V_k \geq V;$$

$$V_k = T_k F_k H_k,$$

где T_k — время, выделяемое для передачи сообщения в канале связи; F_k — полоса пропускания канала связи; H_k — возможное отношение средних уровней мощностей сигнал/шум, определяемое приемопередающими устройствами.

Удельная содержательность сигнала, переносящего информацию по каналам инфокоммуникационной сети, показывает, насколько эффективно используется сигнал данного объема для передачи сведений, т. е. плотность упаковки передаваемой информации в объеме сигнала.

Такой подход обладает достоинствами, позволяющими учесть целенаправленность функционирования инфокоммуникационной сети. Требования же информационной системы выражаются в необходимости передачи заданного количества информации. Данный подход актуален для оценки отдельных каналов связи инфокоммуникационных сетей или телекоммуникационных сетей с коммутацией каналов, но не целесообразен для оценки сетей с пакетной коммутацией и промежуточным хранением информации. Поэтому оценка качества функционирования АИС с учетом сложных и взаимосвязанных процессов на транспортном и сетевом уровнях ЭМВОС требует использования других показателей.

В работе [6] рассматривается показатель оценки эффективности функционирования ИС и ее элементов, основанный на определении отношения полезного эффекта функционирования к соответствующим затратам. Расчет данного показателя предполагает построение метрического пространства показателей

качества функционирования и вычисление обобщенного показателя — объема ИС:

$$W = \Pi \times V \times T,$$

где Π — производительность инфокоммуникационной сети; V — скорость передачи информации в инфокоммуникационной сети; T — точность передачи информации в инфокоммуникационной сети, а также показателя Ливн, представляющего собой удельную себестоимость:

$$y = \frac{C}{W},$$

где C — затраты на организацию и эксплуатацию ИС.

К достоинствам данного показателя эффективности функционирования инфокоммуникационных сетей можно отнести его практическую применимость для реально существующих или проектируемых сетей. В то же время такое объединение нескольких показателей в один может привести к компенсации недостатка одного показателя избытком другого. Кроме того, рассчитанные значения объема инфокоммуникационной сети W и, соответственно, удельной стоимости Y не отражают степень достижения ее цели функционирования и качество результата. Например, произведение близких по физическому смыслу показателей — производительности и скорости передачи — не имеет ясного физического смысла и, тем более, не отражает целевую направленность рассматриваемой инфокоммуникационной сети.

В работе [7] в качестве показателя эффективности информационного обмена в инфокоммуникационных сетях предложен коэффициент полезного действия как универсальный обобщенный параметр. Данный показатель характеризует информационные возможности инфокоммуникационной сети и показывает ее степень близости к предельным возможностям передачи информации:

$$\eta = \frac{KW}{KW_{\text{полн}}} \cdot 100 \%,$$

где $KW = NG|_T$ — кибернетическая мощность инфокоммуникационной сети; N — число информационных сообщений в инфокоммуникационной сети; G — производительность инфокоммуникационной сети; T — временной интервал усреднения;

$KW_{\text{полн}} = \sum_{i=1}^n \left(N_i \cdot \sum_{k=1}^s C_{k,i} \right)$ — полная кибернетическая мощность инфокоммуникационной сети; N_i — емкости буферов запоминающего устройства; n — число буферов запоминающего устройства; $C_{k,i}$ — пропускные способности k -го канала связи инфокоммуникационной сети, обслуживающий i -й буфер; s — число каналов связи, обслуживающих i -й буфер.

В целях учета деструктивного воздействия помех значение коэффициента полезного действия η подлежит уточнению:

$$\eta_{\text{пом}} = -\eta \lg P_{\text{ош}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ош}} = N_{\text{ош}}/N_{\text{общ}}$ — вероятность ошибки приема одиночной элементарной посылки; $N_{\text{общ}}$ — общее число одиночных элементарных посылок; $N_{\text{ош}}$ — число ошибочно принятых одиночных посылок.

Данный показатель в целом не отражает целенаправленность функционирования инфокоммуникационной сети. Например, для увеличения коэффициента полезного действия направления связи необходимо приближать его производительность к суммарным пропускным способностям всех каналов связи, образующих данное направление связи. При этом требования вышестоящей (информационной или управляющей) системы, в интересах которой и функционирует данная инфокоммуникационная сеть, по числу предоставляемых видов и услуг связи, а также их качеству не принимаются во внимание.

Другим фактором, ограничивающим применение данного показателя, является практическая невозможность учитывать воздействие помех в каналах связи инфокоммуникационной сети при значениях вероятности ошибки одиночной элементарной посылки менее значения 10^{-1} [7]. Известно, что нормальная работа каналов связи может быть обеспечена при значениях вероятности ошибки не более $10^{-4} \dots 10^{-5}$ [5, 8]. В результате этого каналы связи с вероятностями ошибок более 10^{-1} уже можно считать непригодными для использования по назначению, и, соответственно, оценивать эффективность функционирования инфокоммуникационных сетей с помощью выражения (1) не имеет смысла. Исходя из этого практическое применение представленного показателя невозможно.

В работе [9] в качестве показателя эффективности функционирования ИС предложен риск средних и общих материальных потерь, которые несет пользователь из-за неверно переданной информации. Достоинством такого

подхода является то, что оценка эффективности ИС осуществляется с учетом требований вышестоящей системы (в качестве таковой рассматривается система управления). В этом случае можно считать, что каждое передаваемое сообщение (информация) используется для принятия какого-либо решения. Задержка, искажение, потеря сообщения влечет за собой его ошибочность, что в свою очередь приводит к возникновению определенных материальных потерь (затрат). В данном случае предполагается, что в подавляющем большинстве случаев при передаче информации ее задержка или искажение приводят к негативным последствиям, поэтому эффективность функционирования системы связи целесообразно оценивать не по положительному эффекту, а по отрицательному, т. е. определять вызванный указанными выше причинами ущерб — материальные затраты. При этом под риском R понимается произведение потерь G при ошибочно переданном сообщении на вероятность p возникновения потерь в канале передачи данной системы связи [9]:

$$R = pG.$$

Данный показатель во многом свободен от вышеуказанных недостатков. Тем не менее, значительную сложность представляет установление аналитических зависимостей между качеством результата функционирования рассматриваемой ИС и возможными потерями вышестоящей системы (управления), а также определение показателя потерь. Это во многом ограничивает применимость данного показателя для оценки реальных ИС и значительно усложняет трактовку полученных численных значений.

Таким образом, существующие показатели и способы оценки эффективности ИС, в том числе и АИС и, как следствие, информационных систем не в состоянии достаточно корректно оценивать степень достижения цели ее функционирования и качество получаемого результата.

Математическая модель средних потерь пропускной способности авиационной инфокоммуникационной сети

Для адекватной оценки качества функционирования информационной системы в системе управления авиационной ОТС рассмотрим место АИС и выполняемые ею функции, используя пример, показанный на рис. 2 (см. третью сторону обложки).

Как видно из рис. 2, источником информации является объект и субъект управления, в общем случае образующие систему управления авиационной ОТС. Объект управления функционирует по определенным алгоритмам, взаимодействуя с окружающей средой и влияя на последнюю; в определенные моменты времени передает информацию о своем состоянии и результатах своего функционирования субъекту управления. Субъект управления на основе получаемой информации и целей функционирования принимает определенные решения и передает объекту управления управляющую информацию. АИС является в этой системе технической основой информационной системы и системы управления авиационной ОТС, предоставляя в процессе своего функционирования возможность обмена информацией между объектом и субъектом управления. Передаваемая информация может быть представлена в любой форме, соответствующей видам и услугам связи, полностью определяемой пропускной способностью каналов связи. Таким образом, результатом функционирования АИС являются требуемые для системы управления авиационной ОТС виды и услуги связи (информационные услуги), определяемые пропускными способностями каналов связи АИС.

Известно, что максимальная реализация потенциальных возможностей объекта управления полностью определяется качеством решений, принимаемых субъектом управления, которое, в свою очередь, зависит от полноты и достоверности получаемой информации о состоянии объекта и условиях выполнения задачи объектом управления, а также от качества самого субъекта управления. Поэтому очевидно, что для конкретных вышеперечисленных характеристик неограниченное увеличение пропускных способностей каналов АИС не сможет улучшить результат функционирования объекта управления. Для получения заданного результата функционирования объекта управления необходимо и достаточно, чтобы пропускные способности каналов сети были не меньше трафика между субъектом и объектом управления.

Исходя из этого обоснование показателя и критерия качества функционирования АИС базируется на следующих утверждениях:

- результатом функционирования АИС является формирование и поддержание в работоспособном состоянии каналов связи с заданной пропускной способностью;
- критерием качества сети по пропускной способности является критерий пригодности, так как увеличение пропускных спо-

способностей выше необходимого уровня не приводит к улучшению работы системы управления авиационной ОТС;

- уменьшение пропускных способностей ниже значения, необходимого для нормального функционирования системы управления авиационной ОТС, ухудшает качество ее функционирования и, как следствие, приводит к снижению качества результата выполнения задачи объектом управления;
- исходя из состава и структуры АИС можно заключить, что снижение пропускных способностей может быть вызвано, во-первых, деструктивным воздействием окружающей среды, приводя к отказу узлов и линий связи; во-вторых, несогласованностью внутренних механизмов обработки трафика на различных уровнях ЭМВОС и органов управления, приводя к перегрузкам в сети. Учитывая случайный характер деструктивных воздействий и входного трафика, процессы снижения пропускных способностей также можно считать случайными.

Все это позволяет утверждать, что снижение качества функционирования АИС приводит к ухудшению качества функционирования системы управления авиационной ОТС, определяемого потерями в управлении. Данные потери могут выражаться, например, в снижении качества принимаемых решений, вызванных потерей (или искажением) информации. В свою очередь снижение качества управления приводит к ухудшению качества функционирования объекта управления или полностью авиационной ОТС, частью которой она является.

Подход, представленный в работе [9], как раз и раскрывает, каким образом снижение качества функционирования сети приводит к снижению ценности передаваемой информации и, как следствие, к потерям вышестоящей системы, в рассматриваемом случае системы управления авиационной ОТС. Но выявление механизма, связывающего потери системы управления с ухудшением качества АИС, является основной сложностью практического применения данного подхода. На практике довольно сложно определить начальную ценность информации и характер ее зависимости от задержки передачи. Начальная ценность почти полностью будет определяться конкретными условиями обстановки, решаемой задачей и способом применения авиационной ОТС, выразить которые в конкретном значении практически невозможно. К тому же о характере данной зависимости можно всего лишь предполагать, поскольку она также будет зависеть от

тех же условий. Поэтому выявить устойчивую повторяющуюся связь между качеством функционирования сети и качеством функционирования системы управления можно только на уровне этих систем с точки зрения достижения ими определенного результата.

Поскольку результатом функционирования АИС является ее пропускная способность, в результате различных случайных явлений, обусловленных несогласованностью работы внутренних протоколов, воздействием деструктивных воздействий и других причин, будут происходить потери пропускной способности. В этом случае для системы управления, функционирующей в конкретных условиях обстановки, важно знать, насколько в этих условиях может снизиться пропускная способность сети.

В связи с этим целесообразным для оценки качества функционирования АИС является использование значения потерь ее пропускной способности $P(\lambda, \gamma)$, где λ — требуемая пропускная способность или входной трафик АИС; γ — реально достигаемая пропускная способность (производительность) сети или ее оценка.

Функция потерь $P(\lambda, \gamma)$ представляет собой априорную оценку последствий функционирования системы управления авиационной ОТС при использовании АИС, характеризуемой способом ее применения в конкретных условиях обстановки. Вероятностный характер причин, вызывающих потери пропускной способности сети, позволяет ввести вероятностную меру на пространстве событий Γ , приводящих к потерям, сопоставив при этом каждому из них определенное значение потерь $P \in \Pi$. Задание вероятностных мер для возможных событий позволяет априорно определить ожидаемое значение потерь для каждой сети или способа ее применения на основе вычисления различных математических функций потерь $P(\lambda, \gamma)$ или рисков, которые являются оценкой ожидаемых последствий [10]. Это позволяет системе управления осуществлять выбор АИС или способ ее применения на основе минимального значения потерь или рисков. При этом не только оперативно-техническое, но и организационное управление АИС также может осуществляться на основе минимизации величины соответствующих рисков.

Такое понимание рисков полностью соответствует определению работы [11], где под риском понимается следствие влияния неопределенности на достижение поставленных целей. В данном случае под целью функционирования АИС понимается создание или поддержа-

ние информационных направлений с требуемыми пропускными способностями.

В качестве примера рассмотрим случай, когда снижение пропускных способностей АИС может произойти в результате двух событий — потери связности сети, вызванной отказом элементов сети в результате деструктивных воздействий, и перегрузки сети, обусловленной несогласованностью работы ее протоколов.

Рассмотрим множество событий Γ , определяющих состояние сети:

Γ_0 — обмен в сети осуществляется без снижения пропускной способности, сеть связная;

Γ_1 — обмен в информационном направлении не осуществляется по причине несвязности сети, вызванной воздействием дестабилизирующих факторов, при этом перегрузка в сети отсутствует;

Γ_2 — обмен в информационном направлении осуществляется, но пропускная способность направления снижена в результате перегрузки сети, при этом связность сети не ухудшилась;

Γ_3 — обмен в информационном направлении не осуществляется по причине несвязности сети, вызванной воздействием дестабилизирующих факторов на элементы сети, при этом пропускная способность сети уменьшилась в результате ее перегрузки.

Все вышеперечисленные события составляют полную группу, при этом каждое из них имеет определенное значение вероятности:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1.$$

Вероятность P_0 нахождения АИС в состоянии Γ_0 определяется вероятностью связности сети $P_{св}$ и вероятностью того, что АИС не находится в состоянии перегрузки (или состоянии блокирования):

$$P_0 = P_{св}(1 - P_{бл}). \quad (2)$$

Связность сети определяется, во-первых, устойчивостью ее элементов, характеризуемых коэффициентами готовности, а во-вторых, числом направлений связи для каждого информационного направления, т. е. числом путей (маршрутов) между каждой парой отправитель—получатель информации. Под состоянием перегрузки или блокирования сети будем понимать такое ее состояние, при котором часть входного трафика сетью отвергается, в результате чего происходит снижение пропускной способности.

Вероятность P_1 нахождения АИС в состоянии Γ_1 определяется устойчивостью функционирования сети в условиях воздействия вну-

тренних и внешних дестабилизирующих факторов [8] в отсутствии блокировки сети:

$$P_1 = (1 - P_{св})(1 - P_{бл}). \quad (3)$$

Вероятность P_2 нахождения АИС в состоянии Γ_2 определяется возможностями сети по обработке и хранению информации, которые характеризуют вероятностью блокировки, т. е. состояния, в котором сеть не может принять новую информацию при условии, что сеть связна:

$$P_2 = P_{св}P_{бл}. \quad (4)$$

Вероятность P_3 нахождения АИС в состоянии Γ_3 определяется вероятностью нахождения сети в несвязном состоянии и вероятностью блокировки сети:

$$P_3 = (1 - P_{св})P_{бл}. \quad (5)$$

Каждая из вышеперечисленных ситуаций с известной вероятностью может привести к определенным потерям пропускной способности сети. Исходя из того, что АИС должна обрабатывать предлагаемый трафик, обеспечивая заданное качество предоставляемых пользователям услуг и видов связи, то очевидно, что и потери необходимо оценивать относительно последнего. В этом случае пусть λ — входной трафик сети, γ — реально достигаемая пропускная способность или производительность сети, тогда относительные потери пропускной способности для событий Γ_2 и Γ_3 можно представить в виде

$$\begin{aligned} \Gamma_2: \Pi_2 &= \frac{\lambda - \gamma}{\lambda}; \\ \Gamma_3: \Pi_3 &= \frac{\gamma}{\lambda}, \end{aligned} \quad (6)$$

т. е. в ситуации Γ_2 при сохранении связности сети теряется часть пропускной способности. Наоборот, в ситуации Γ_3 , когда при возникновении в сети перегрузки происходит еще и потеря связности, в результате происходит потеря всей реально достигнутой пропускной способности γ . Для события Γ_1 , когда происходит потеря связности, но реально достигнутая пропускная способность полностью соответствует входному трафику, потерю пропускной способности запишем следующим образом:

$$\Gamma_1: \Pi_1 = \frac{\gamma}{\lambda} \Big|_{\gamma=\lambda} = 1. \quad (7)$$

Следует отметить, что вполне возможно оценивать потери не относительно входной нагрузки λ , а относительно максимальной пропускной способности сети μ . В этом случае потери будут характеризовать не потери качества связи для пользователей сети, а снижение возможностей сети по передаче информации относительно их максимальных значений.

Обобщая выражения (2)–(7) и учитывая, что для события Γ_0 потери пропускной способности будут нулевыми, запишем выражение для определения средних потерь пропускной способности АИС:

$$R = \sum_{i=1}^3 P_i \Pi_i$$

или

$$R = (1 - P_{св})(1 - P_{бл}) + P_{св} P_{бл} \frac{\lambda - \gamma}{\lambda} + (1 - P_{св}) P_{бл} \frac{\gamma}{\lambda}. \quad (8)$$

Вероятность блокировки сети исходя из определения, данного выше, можно определить следующим образом. На рис. 3 показана нагрузка λ , определяемая как число пакетов, поступающих в сеть в единицу времени. При вероятности блокировки $P_{бл}$ нагрузка, принимаемая сетью и поступающая ее пользователям, будет равна $\lambda(1 - P_{бл})$, соответственно отбрасываемая нагрузка будет определяться как $\lambda P_{бл}$. Поэтому для АИС, представленной любой консерватив-

ной моделью, реально достижимая пропускная способность будет определяться как [12]:

$$\gamma = \lambda(1 - P_{бл}).$$

При расчетах вероятность блокировки сети можно найти, используя конкретную модель системы массового обслуживания, например, для модели М/М/1 вероятность блокировки будет определяться как [12]

$$P_{бл} = \frac{(1 - \rho) \rho^N}{1 - \rho^{N+1}},$$

где $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ — коэффициент использования сети, μ — максимальная пропускная способности сети; N — заданная длина очереди (число пакетов, находящихся в сети, либо размер буферных устройств в узлах сети).

Таким образом, с помощью выражения (8) можно оценить риск потери реально достигаемой пропускной способности (производительности) АИС по отношению к потребителям, т. е. системе управления авиационной ОТС. В этом случае снижение пропускной способности сети однозначно приведет к ухудшению качества и/или уменьшению числа предоставляемых услуг и видов связи. Поэтому такой риск можно еще назвать риском потери качества предоставляемых услуг и видов связи.

Если определим риск в соответствии с выражением

$$R = (1 - P_{св})(1 - P_{бл}) \frac{\gamma}{\mu} + P_{св} P_{бл} \frac{\lambda - \gamma}{\mu} + (1 - P_{св}) P_{бл} \frac{\gamma}{\mu},$$

т. е. вместо значения входного трафика λ подставим значение максимальной пропускной способности сети μ , то получим риск потери пропускной способности сети относительно ее максимальных возможностей по передаче информации.

Результаты расчетов средних потерь пропускной способности авиационной инфокоммуникационной сети

На рис. 4 представлены зависимости средних потерь пропускной

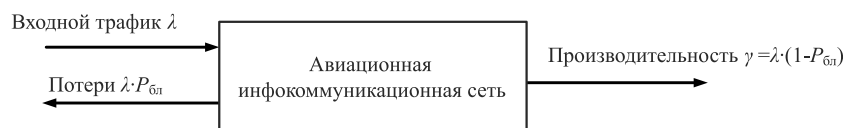


Рис. 3. Процесс обработки входного трафика сетью

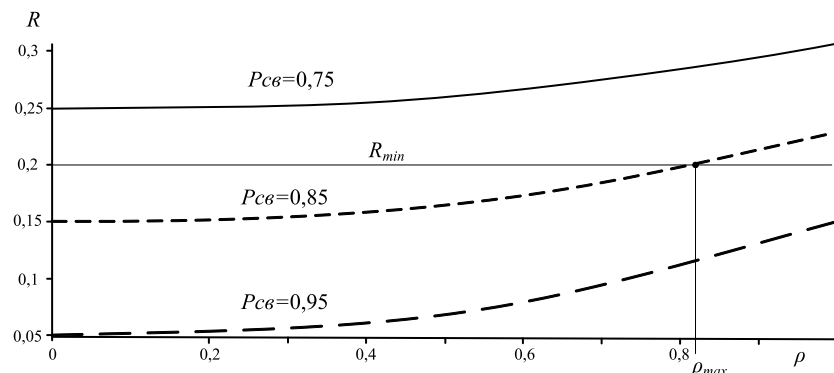


Рис. 4. Зависимости средних потерь пропускной способности R от входного трафика ρ

способности R от относительного значения входного трафика ρ для различных значений вероятности связности сети $P_{св}$.

Из представленных зависимостей следует, что при небольших значениях входного трафика λ средние потери полностью определяются связностью сети, т. е. способностью сети устойчиво функционировать при воздействии различных дестабилизирующих факторов. При увеличении интенсивности входного трафика λ потери пропускной способности будут обуславливаться уже не столько ее связностью, а способностью функционировать в состоянии перегрузки за счет использования эффективных сетевых протоколов. В этом случае высокая связность сети обуславливает более быстрый рост средних потерь пропускной способности. Следовательно, с одной стороны, увеличение количества обмениваемой информации обуславливает более быстрое и точное нахождение оптимального коалиционного решения, а с другой стороны, приводит к снижению устойчивости информационной инфраструктуры и, как следствие, приводит к снижению конфликтной устойчивости рассматриваемой авиационной ОТС.

Например, для информационного направления со связностью 0,85 минимальное значение потерь задано значением $R_{\min} = 0,2$. Для поддержания такого значения потерь пропускной способности нагрузка не должна превышать значения $\rho \leq 0,82$.

Оценить эффект технических и организационных мероприятий по обеспечению устойчивости сети можно следующим относительным показателем:

$$r = \frac{R_1 - R_0}{R_0},$$

где R_0 , R_1 — начальное и конечное значения средних потерь пропускной способности сети; r — коэффициент эффективности мероприятий по обеспечению устойчивости сети, характеризующий степень изменения средних потерь пропускной способности.

Заключение

В представленных методологических основах научные подходы и методы обеспечивают формирование показателей и проведение оценки устойчивости функциональной авиационной информационной системы, для ситу-

аций, в которых могут снижаться пропускные способности АИС.

Предложенные показатели устойчивости функционирования АИС и рисков потери достигаемой пропускной способности (производительности) и технической пропускной способности позволяют учесть:

- целевую направленность сети — реально достигаемую пропускную способность или производительность, которая характеризует результат функционирования сети, заключающийся в предоставлении требуемого числа видов и услуг связи;
- качество результата функционирования: оценка производительности сети для фиксированного значения задержки передачи пакетов определяет качество предоставляемых видов и услуг связи;
- степень достижения результата: вероятность связности характеризует нижнюю границу средних потерь пропускной способности, а также возможность создания такой структуры сети, которая обеспечит заданную производительность.

Указанные свойства данных показателей позволяют осуществить оценку необходимого условия конфликтной устойчивости авиационной ОТС, основанную не только на оценке устойчивости информационной инфраструктуры, но и на качестве предоставляемых ею услуг.

Список литературы

1. Глобальный аэронавигационный план на 2013—2028 гг. Doc 9750-AN/963. Монреаль: Международная организация гражданской авиации, 2013. 128 с.
2. ГОСТ Р 53724—2009. Качество услуг связи. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2011. 12 с.
3. Морозов Л. М., Петухов Г. Б., Сидоров В. Н. Методологические основы теории эффективности. Ленинград: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1982. 236 с.
4. Вентцель Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1988. 208 с.
5. Харкевич А. А. Очерки общей теории связи. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955. 272 с.
6. Карганов В. В., Расчесова А. Г., Кудряшов В. А. Показатель оценки эффективности систем связи и их элементов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. № 1 (236). С. 7—14.
7. Межуев А. М., Пасечников И. И., Родзевич А. И., Роза А. Н., Коновальчук Е. В. Патент RU 2602347 С1. Способ оценки эффективности информационного обмена системы связи / Номер заявки: 2015132753/08; Дата регистрации: 05.08.2015; Дата публикации: 20.11.2016 Бюл. № 32.
8. ГОСТ Р 53111—2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. М.: Стандартинформ, 2009. 19 с.

9. Головин О. В., Простов С. П. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи. М.: Горячая линия-Телеком, 2006. 598 с.

10. ГОСТ Р 51897—2011. Менеджмент риска. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2012. 16 с.

11. Репин В. Г., Тартаковский Г. П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Советское радио, 1977. 432 с.

12. Шварц М. Сети связи: протоколы, моделирование и анализ: В 2-х ч. Ч. 1: Пер. с англ. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. 336 с.

L. E. Mystrov, Dr. Sc., Professor, e-mail: mistrov_le@mail.ru,
Central Branch of the Russian State University of Justice, Voronezh,
E. V. Golovchenko, Ph.D., Senior of lecturer, e-mail: evvigo@mail.ru,
Military Training and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy
named after Professor N. Ye. Zhukovsky and Yu.A. Gagarina", Voronezh

Methodological Bases of Evaluation of the Sustainability of the Operation of the Aviation Information System

The article shows the interdependent relationship between the conflict stability of aviation organizational and technical systems and their support for the use of information and communication networks. A new indicator of the stability of the functioning of aviation information and communication networks is proposed, based on the provisions of probability theory and allowing to determine the lower estimate of the conflict stability of aviation organizational and technical systems.

Keywords: operational stability, operational efficiency, aviation information and communication networks, risk, throughput

DOI: 10.17587/it.26.430-440

References

1. Global Air Navigation Plan of 2013—2028 years. Doc 9750-AN/963, Montreal, International Civil Aviation Organization, 2013, 128 p. (in Russian).

2. GOST R 53724—2009. The quality of communication services. General Provisions, Moscow, Standardinform, 2011, 12 p. (in Russian).

3. Morozov L. M., Petuchov G. B., Sidorov V. N. The Methodological bases of theory of efficiency, Leningrad city, VIKI name of Mozhaisk, 1982. 236 p. (in Russian).

4. Ventsel E. S. Research of operation: the objective, the principles, methodology. Moscow, Science, 1988, 208 p. (in Russian).

5. Kharkevich A. A. Essays on the general theory of communication, Moscow, State publishing house of technical and theoretical literature, 1955, 272 p. (in Russian).

6. Karganov V. V., Raschesova A. G., Kudryashov V. A. Indicator for evaluating the effectiveness of communication systems and their elements, *Scientific and technical statements of SPbSPU*, 2016, no. 1 (236), pp. 7—14 (in Russian).

7. Mezhuiev A. M., Pasechnikov I. I., Rodzevich A. I., Rose A. N., Konovalchuk E. V. Patent RU 2602347 C1, A method for evaluating the effectiveness of information exchange of a communication system, Application number: 2015132753/08, Date of registration: 08/05/2015, Date of publication: 11/20/2016, Bull. Number 32. (in Russian).

8. GOST R 53111—2008. Stability of the functioning of the public communication network. Requirements and verification methods. Moscow, Standartinform, 2009, 19 p. (in Russian).

9. Golovin O. V., Prostov S. P. Systems and devices for short-wave radio communication, Moscow, Hotline-Telecom, 2006, 598 p. (in Russian).

10. GOST R 51897—2011. Risk management. Terms and Definitions, Moscow, Standartinform, 2012, 16 p. (in Russian).

11. Repin V. G., Tartakovsky G. P. Statistical synthesis with a priori uncertainty and adaptation of information systems, Moscow, Soviet Radio, 1977, 432 p. (in Russian).

12. Schwartz M. Communication Networks: Protocols, Modeling and Analysis, vol. 1, Moscow, Science. Ch. ed. Phys.-Math. lit., 1992, 336 p. (in Russian).

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор Е. В. Конова.

Корректор М. Ю. Безменова.

Сдано в набор 11.05.2020. Подписано в печать 23.06.2020. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ ИТ720. Цена договорная.

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

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

Оригинал-макет ООО "Авансд солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансд солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье Л. Е. Мистрова, Е. В. Головченко

«МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВИАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ»

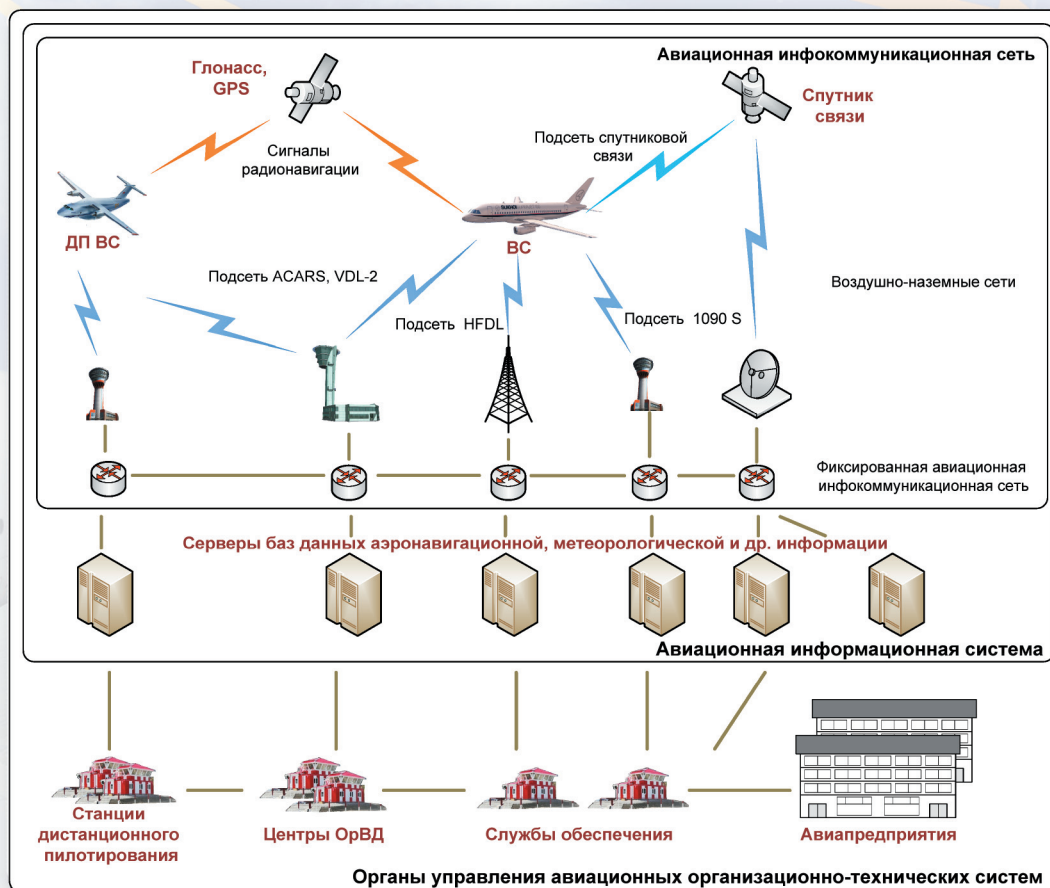


Рис. 1. Обобщенная структура авиационной информационной сети



Рис. 2. Обобщенная структура системы управления авиационной ОТС

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» выпускает научно-технические журналы



Ежемесячный теоретический
и прикладной научно-технический журнал

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

Подписной индекс по Объединенному каталогу
«Пресса России» – 72656



Научно-практический
и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

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

Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79963

Междисциплинарный
теоретический и прикладной
научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

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



Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79493



Ежемесячный теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

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

Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79492

Теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

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



Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 22765

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:

107076, Москва, Строминский пер., 4. Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ".
Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10. E-mail: antonov@novtex.ru