

*Intellectual Technologies
on Transport
No 4*



*Интеллектуальные технологии
на транспорте
№ 4*

*Санкт-Петербург
St. Petersburg
2018*

Интеллектуальные технологии на транспорте № 4, 2018

Сетевой электронный научный журнал, свободно распространяемый через Интернет.
Публикуются статьи на русском и английском языках с результатами исследований и практических достижений в области интеллектуальных технологий и сопутствующих им научных исследований.

Журнал основан в 2015 году.

Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

Сопредседатели редакционного совета

Панычев А. Ю., ректор ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Чаркин Е. И., директор по ИТ ОАО «РЖД», Москва, РФ

Главный редактор

Хомоненко А. Д., проф., С.-Петербург, РФ

Редакционный совет

Глухов А. П., вед. НС ГВЦ ОАО «РЖД», Москва, РФ
Дудин А. Н., д.т.н., проф., БГУ, Минск, Беларусь
Илларионов А. В., советн. «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
Саров, РФ
Корниенко А. А., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Ковалец П., проф., Тех. ун-т, Варшава, Польша
Меркурьев Ю. А., проф., РТУ, Рига, Латвия

Нестеров В. М., проф., С.-Петербург, РФ
Пустарнаков В. Ф., ген. дир. «Газинформсервис»,
С.-Петербург, РФ
Титова Т. С., проф., прорект. ПГУПС,
С.-Петербург, РФ
Федоров А. Р., ген. дир. «ДигДез», С.-Петербург, РФ
Юсупов Р. М., проф., чл.-корр. РАН, С.-Петербург, РФ

Редакционная коллегия

Бубнов В. П., проф., С.-Петербург, РФ – зам. гл. ред.
Ададулов С. Е., проф., С.-Петербург, РФ
Александрова Е. Б., проф., С.-Петербург, РФ
Атилла Элчи, проф., Аксарай, Турция
Безродный Б. Ф., проф., Москва, РФ
Благовещенская Е. А., проф., С.-Петербург, РФ
Булавский П. Е., д.т.н., доц., С.-Петербург, РФ
Василенко М. Н., проф., С.-Петербург, РФ
Гуда А. Н., проф., Ростов-на-Дону, РФ
Железняк В. К., проф., ПГУ, Беларусь
Заборовский В. С., проф., С.-Петербург, РФ
Зегжда П. Д., проф., С.-Петербург, РФ
Канаев А. К., д.т.н., проф., С.-Петербург, РФ
Котенко А. Г., д.т.н., доц., С.-Петербург, РФ
Куренков П. В., проф., Москва, РФ
Лецкий Э. К., проф., Москва, РФ

Мирзоев Т. А., асс., проф., Джорджия, США
Наседкин О. А., доц., С.-Петербург, РФ
Никитин А. Б., проф., С.-Петербург, РФ
Охтилев М. Ю., проф., С.-Петербург, РФ
Соколов Б. В., проф., С.-Петербург, РФ
Таранцев А. А., проф., С.-Петербург, РФ
Утепбергенов И. Т., проф., Алматы,
Казахстан
Филипченко С. А., доц., Москва, РФ
Фозилов Ш. Х., проф., Ташкент, Узбекистан
Фу-Ниан Ху, проф., Джиангсу, Китай
Хабаров В. И., проф., Новосибирск, РФ
Ходаковский В. А., проф., С.-Петербург, РФ
Чехонин К. А., проф., Хабаровск, РФ
Яковлев В. В., проф., С.-Петербург, РФ
Ялышев Ю. И., проф., Екатеринбург, РФ

Адрес редакции

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, ауд. 1–210
e-mail: itt-pgups@yandex.ru, сайт: <http://itt-pgups.ru>

ISSN 2413-2527

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций,
свидетельство Эл № ФС77-61707 от 07 мая 2015 г.

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», 2018

Разрешается воспроизведение в прессе, а также сообщение в эфире или передача по кабелю опубликованных в составе периодического издания – журнала «Интеллектуальные технологии на транспорте» – статей по текущим экономическим, политическим, социальным и религиозным вопросам с обязательным указанием автора статьи и сетевого электронного научного периодического издания журнала «Интеллектуальные технологии на транспорте».

Intellectual Technologies on Transport Issue № 4, 2018

Network electronic scientific journal, open access. It publishes articles in Russian and English with the results of research and practical achievements in the field of intelligent technologies and associated research

Founded in 2015

Founder and Publisher

Federal State Educational Institution of Higher Education
«Emperor Alexander I Petersburg State Transport University»

Co-chairs of the Editorial Council

Panychev A. Yu., rector of PSTU, St. Petersburg, Russia
Charkin E. I., director on IT of JSC «RZD», Moscow, Russia

Editor-in-Chief

Khomonenko A. D., Prof., St. Petersburg, Russia

Editorial Council Members

Glukhov A.P., Lead. Res., CCC of JSC «RZD»,
Moscow, Russia

Dudin A.N., Prof., BSU, Minsk, Belarus

Illarionov A.V., advisor, «RFNC-VNIIEF», Sarov,
Russia

Kornienko A.A., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Kovalets P., Prof., Tech. University, Warsaw, Poland

Merkuryev Yu.A., Prof., Academician
of the Latvian Academy of Sciences,
Riga, Latvia

Nesterov V.M., Prof., St. Petersburg,
Russia

Pustarnakov V.F., CEO at «Gazinformservice» LTD.,
St. Petersburg, Russia

Titova T.S., Prof., PSTU, St. Petersburg,
Russia

Fedorov A.R., CEO at «Digital Design» LTD., St. Petersburg,
Russia

Yusupov R.M., Prof., Corr. Member of RAS, St. Petersburg,
Russia

Editorial Board Members

Bubnov V.P., Prof., St. Petersburg, Russia –
Deputy Editor-in-Chief

Adadurov S.E., Prof., St. Petersburg, Russia

Aleksandrova E.B., Prof., St. Petersburg, Russia

Attila Elci, Prof., Aksaray, Turkey

Bezrodny B.F., Prof., Moscow, Russia

Blagoveshenskaya E.A., Prof., St. Petersburg, Russia

Bulavsky P.E., Dr. Sc., As. Prof., St. Petersburg, Russia

Vasilenko M.N., Prof., St. Petersburg, Russia

Guda A.N., Prof., Rostov-on-Don, Russia

Geleznyak V.K., Prof., PSU, Belarus

Zaborovsky V.S., Prof., St. Petersburg, Russia

Zegzda P.D., Prof., St. Petersburg, Russia

Kanayev A.K., Prof., St. Petersburg, Russia

Kotenko A.G., Dr. Sc., As. Prof., St. Petersburg, Russia

Kurenkov P.V., Prof., Moscow, Russia

Letsky Ad.K., Prof., Moscow, Russia

Mirzoev T., As. Prof., Georgia, USA

Nasedkin O.A., As. Prof., St. Petersburg, Russia

Nikitin A.B., St. Petersburg, Russia

Okhtilev M.Yu., Prof., St. Petersburg, Russia

Sokolov B.V., Prof., St. Petersburg, Russia

Tarantsev A.A., Prof., St. Petersburg, Russia

Utepbergenov I.T., Prof., Almaty, Khazakhstan

Filipchenko S.A., As. Prof., Moscow, Russia

Fozilov Sh.Kh., Prof., Tashkent, Uzbekistan

Fu-Nian Hu, Prof., Jiangsu, China

Khabarov V.I., Prof., Novosibirsk, Russia

Khodakovskiy V.A., Prof., St. Petersburg, Russia

Chekhonin K.A., Prof., Khabarovsk, Russia

Jakovlev V.V., Prof., St. Petersburg, Russia

Jalyshev Yu.I., Prof., Ekaterinburg, Russia

Editorial adress

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, aud. 1–210

e-mail: itt-pgups@yandex.ru, <http://itt-pgups.ru>

ISSN 2413-2527

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications and Mass Media,
EL no. FS77-61707 testimony from May 7, 2015.

The journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI).

© Federal State Educational Institution of Higher Education “Emperor Alexander I Petersburg State Transport University”, 2018

The reproduction in the press, as well as a message broadcast or cable published as part of the periodical – journal “Intellectual Technologies on Transport” – articles on current economic, political, social and religious issues with the obligatory indication of the author, and the network of electronic scientific periodical journal “Intellectual Technologies on Transport”.

Содержание

Большаков М.А., Пугачев С.В.

Об использовании алгоритмов анализа и обработки данных системы мониторинга ИТ-сервисов ГВЦ ОАО «РЖД» 5

Лашков И.Б., Кашевник А.М.

Онтологическая модель системы предупреждения аварийных ситуаций на основе поведения водителя в кабине транспортного средства 11

Шардаков К.С.

Последовательный алгоритм генерации матрицы коэффициентов для системы однородных дифференциальных уравнений в модели нестационарной системы обслуживания 20

Смагин В.А., Хомоненко А.Д.

К оцениванию состояний информационных систем с помощью функции энтропии 26

Горшков Я.Р., Кремез Г.В., Михеев Н.В.

Исследование влияния факторов космического пространства на бортовую радиоэлектронную аппаратуру по результатам эксперимента на космическом аппарате «Можаец» 34

Красновидов А.В., Забродин А.В.

Об особенностях обмена данными между приложениями на языках высокого уровня и функциями Matlab 41

Свистунов С.Г.

Алгоритм оптимизации, реализуемый на стохастическом процессоре 51

Contents

| | |
|---|----|
| <i>Bolshakov M.A., Pugachev S.V.</i> About Algorithms for the Analysis and Processing of Data from IT-Services Monitoring Systems in Main Computer Centre JSC RZD | 5 |
| <i>Lashkov I.B., Kashevnik A.M.</i> An Ontology Model for Dangerous Situation Prevention Based on the In-cabin Driver Analysis | 11 |
| <i>Shardakov K.S.</i> Sequential Algorithm for Generating of the Coefficient Matrix of the System of Homogeneous Differential Equations in the non Stationary System Maintenance Model | 20 |
| <i>Smagin V.A., Khomonenko A.D.</i> On the Estimation of the States of Information Systems by Entropy Function | 26 |
| <i>Gorshkov Y.R., Kremez G.V., Miheev N.V.</i> Study of the Influence of Space Factors on the Onboard Radio-Electronic Equipment Based on the Results of Experiment on the Spacecraft «Mozhaets» | 34 |
| <i>Krasnovidov A.V., Zabrodin A.V.</i> On the Peculiarities of the Exchange of Data Between Applications in High-Level Languages and Matla Functions | 41 |
| <i>Svistunov S.G.</i> The Algorithm of Optimization Realized by the Stochastic Processor | 51 |

Об использовании алгоритмов анализа и обработки данных системы мониторинга ИТ-сервисов ГВЦ ОАО «РЖД»

М.А. Большаков

Санкт-Петербургский Информационно-вычислительный центр ОАО «РЖД»
Санкт-Петербург, Россия
bolshakovm@yandex.ru

С.В. Пугачев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
Санкт-Петербург, Россия
nki-pugachev@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются и сравниваются различные инструментальные системы мониторинга ИТ-инфраструктуры Zabbix, Nagios, ManageEngine OpManager, Hewlett Packard Operations Manager, Naumen Network Manager и IBM Tivoli. Указаны функции, которые должна выполнять система мониторинга и управления ИТ-инфраструктурой в целевом состоянии. Описывается текущее состояние системы мониторинга ИТ-инфраструктуры в ОАО «РЖД». Приводятся математическая постановка задачи определения контрольных значений метрик, пример разработки нейронной сети для определения контрольных значений метрик и рекомендации по ее улучшению.

Ключевые слова: мониторинг, ресурсно-сервисные модели, разнородные данные, большие данные, нейросетевые методы, параллельная обработка.

ВВЕДЕНИЕ

Доля охвата автоматизированными системами технологических процессов в ОАО «РЖД» постоянно растет. К настоящему времени в автоматизированных системах накоплено и задействовано в работе огромное количество данных. Новые возможности современных инструментов обработки информации позволяют более полно использовать накапливаемые данные для решения целого ряда текущих задач [1]. Так, все большее признание и потребность в использовании получает технология «большие данные» (Big Data). Следует отметить, что особенностью «больших данных» применительно к компании ОАО «РЖД» является то, что информация поступает из внешних и из внутренних источников. Имеющиеся объемы данных полностью соответствуют принятым в настоящее время характеристикам «больших данных» «7 V»: Volume (объем), Velocity (скорость), Variety (разнообразие), Veracity (достоверность), Variability (изменчивость), Visualization (визуализация), Value (ценность) [2].

Одним из важнейших направлений повышения эффективности деятельности компании является снижение количества отказов и эксплуатационных расходов. При этом способы решения данных вопросов в целом схожи как для железнодорожной инфраструктуры, так и для ИТ-инфраструктуры. Например, одним из подходов к реализации мониторинга состояния железнодорожной инфраструктуры является использования концепции IRV (Instrumented Vehicles), суть которой заключается в оснащении вагонов рабочего парка средствами контроля состоя-

ния инфраструктуры. В локомотивном хозяйстве данные о работе узлов и деталей тягового подвижного состава считываются непосредственно датчиками, находящимися на локомотиве [3]. В ИТ-инфраструктуре применяется аналогичный подход: различными способами снять показания работы всех узлов, где под узлами понимаются элементы вычислительных ресурсов, задействованных в создании ИТ-сервиса.

При этом в вопросе выбора конкретного поставщика системы мониторинга надо исходить из соответствия функционала рассматриваемого решения тем задачам и особенно масштабам задач, которые надо решить на имеющемся в организации ИТ-ландшафте.

О СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ИТ-ИНФРАСТРУКТУРЫ

В настоящее время для решения задачи полного охвата системой мониторинга ИТ-инфраструктуры чаще других применяются следующие инструментальные системы:

- Zabbix – система с открытым кодом, характеризующаяся достаточно высокой производительностью и готовностью к масштабируемости вплоть до данных корпоративного уровня. Благодаря технологии открытого кода и широкой применимости имеет достаточно активное сообщество разработчиков, с помощью которого даже начинающий администратор системы мониторинга может разобраться с инсталляцией и сопровождением достаточно быстро. Однако вопрос непосредственно внедрения (настройки и применения метрик сбора данных) может вызвать у администратора на первых этапах использования серьезные затруднения, так как готовых агентов для мониторинга в данном инструменте нет. Кроме того, к недостаткам относится слабая проработка средств визуализации.

- Nagios – инструмент с открытым исходным кодом со схожими характеристиками (как преимуществами, так и недостатками), что и Zabbix, за исключением оперативности применения новых настроек сбора данных. Если в Zabbix перестраивать алгоритмы сбора данных можно в режиме on-line, то после внесения изменений в Nagios требуется перезагрузка комплекса [4].

- ManageEngine OpManager – инструмент, позволяющий работать также в части автоматизированной реакции на аномальные ситуации. Обладает удобным и понятным интерфейсом, однако ограничен масштабируемостью дан-

ных – полностью оправдывает свое применение на малых и средних предприятиях, на более высоком уровне заметно уступает конкурентам по производительности.

- Hewlett Packard Operations Manager – пример законченной централизованной системы мониторинга, обладающей высокими характеристиками как в части интерфейса пользователя, так и качества работы с данными для различных объемов.

- Naumen Network Manager – российский продукт, обладающий всеми необходимыми параметрами для готового решения по выстраиванию процессов мониторинга ИТ-инфраструктуры. В условиях, когда многие государственные компании направляют усилия на импортозамещение в части ИТ-инструментария, такие продукты, безусловно, должны отвечать всем потребностям клиента. В настоящее время этот инструмент обладает хорошими характеристиками как со стороны удобства развертывания, внедрения и сопровождения, так и со стороны сбора и предоставления итоговых данных мониторинга после необходимой обработки.

- IBM Tivoli – инструмент для построения централизованной системы мониторинга, отличается простотой установки, но процесс первичной конфигурации требует наличия специалистов высокого уровня. Это связано в основном с тем, что его применяют на уровне корпоративных данных, когда этап конфигурации и настройки требует большой работы. В эксплуатации система интуитивно понятна, помимо широкого набора готовых и поддерживаемых со стороны разработчика агентов есть возможность самостоятельно формировать агенты мониторинга с помощью Agent Builder. В линейке мониторинга от данного поставщика имеются инструменты для всех функций мониторинга – от сбора данных посредством различных агентов и обработки получаемых данных до автоматизированного реагирования на сбои и отображения необходимой информации через витрины данных для всех уровней пользователей.

Однако следует понимать, что выбор того или иного поставщика средств мониторинга не приводит к использованию кардинально разных подходов для его реализации. Работающая система мониторинга и управления ИТ-инфраструктурой в целевом состоянии должна выполнять следующие функции:

- обнаружения ИТ-компонентов и определения зависимостей между ними – автоматическая установка агента мониторинга и последующий сбор информации, в том числе с целью поиска связей между данными метриками, характеризующими работу ИТ-компонентов;

- управления производительностью – сбор данных с целью прогнозирования утилизации ресурсов и формирования предложений по перераспределению/балансировке нагрузок;

- корреляции и управления событиями – обеспечение приема сообщений от всех источников данных мониторинга и их последующего анализа с целью обогащения данных о событии, выявления их схожести и определения корневой причины;

- автоматизированного реагирования на события с целью восстановления работоспособности компонента или услуги в целом.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ИТ-ИНФРАСТРУКТУРЫ В ОАО «РЖД»

В настоящее время в ОАО «РЖД» в качестве централизованной системы мониторинга реализовано зонтичное решение, где посредством различных «зондов» на нижнем уровне сбора информации (агентов мониторинга от различных поставщиков) данные передаются и обрабатываются централизованно посредством IBM Tivoli. Благодаря широкому спектру готовых агентов мониторинга от IBM доля «зондов» Tivoli на нижнем уровне мониторинга составляет около 90 % от общего количества инструментов сбора информации по всей ИТ-инфраструктуре ОАО «РЖД», следующие по охвату – средства Zabbix. Именно зонтичная структура системы мониторинга позволяет охватить абсолютно все элементы ИТ-инфраструктуры и обрабатывать эти данные согласно единой логике, избегая различных локальных и не связанных между собой систем мониторинга, например для каждого типа оборудования или географической локации.

Таким образом, основные факторы, влияющие на решение о выборе поставщика, – это готовность работы с имеющимися объемами ИТ-инфраструктуры клиента и цена данного решения. При этом наиболее затратным является именно переход от простого мониторинга ИТ-инфраструктуры к управлению ИТ-инфраструктурой и мониторингу ИТ-сервисов, так как практически у всех поставщиков элементы продуктовой линейки, реализующие функцию обработки и прогнозирования данных, являются самыми дорогостоящими. В том числе поэтому компании зачастую останавливаются в развитии системы мониторинга на уровне сбора информации по оборудованию и генерации событий о его отказах, не рассматривая связи между его элементами.

В целевом состоянии в результате инвентаризации всех ресурсов, задействованных в предоставлении ИТ-сервиса, и последующего определения влияния элементов друг на друга и на ключевые показатели работоспособности всего сервиса определяется так называемая **ресурсно-сервисная** модель. Это понятие является ключевым для оценки возможных последствий отказов/сбоев в работе отдельных элементов инфраструктуры на итоговую возможность предоставления ИТ-сервиса. При этом состояние каждого элемента характеризуется метриками, снимаемыми автоматизированным способом [5].

Полученные значения метрик сравниваются с контрольными, и при их выходе за допустимые пределы система мониторинга оповещает причастный персонал технической поддержки о нештатном состоянии сервиса. При этом встает задача корректного определения этих контрольных или граничных значений нормального состояния для каждой метрики и их связей между собой.

Первоначально данные значения определяют экспертным путем, однако риск субъективизма в данном случае полностью исключить невозможно. Именно поэтому задача поддержания в актуальном состоянии граничных значений и их связей между собой для большого количества метрик является достаточно сложной, кроме того, при постоянном привлечении группы экспертов – затратной [6–8].

В рамках текущего уровня развития системы мониторинга ИТ в ГВЦ ОАО «РЖД» объем данных находится на уровне 11 терабайт, при этом данное значение будет лишь увеличиваться, так как для решения задачи автоматизированной приоритизации метрик, снимаемых с ИТ-инфраструктуры, и формирования ресурсно-сервисных моделей требуется больший, чем сейчас, горизонт хранения данных. В настоящее время при хранении агрегированных данных по большинству метрик горизонт хранения находится в интервале от 1 до 3 месяцев. Непосредственно первичные данные хранятся существенно меньше.

При этом в распоряжении специалистов, ответственных за мониторинг и сопровождение ИТ-инфраструктуры, находится 1318 уникальных метрик, комбинации из которых и накладываются на выбранные ИТ-сервисы. Особое внимание должно быть уделено разнородности данных по указанным метрикам. Например, по каждому ИТ-сервису должны анализироваться такие метрики, как численные значения утилизации процессоров, выраженные в процентах, оставшееся свободное место на виртуальном сервере в мегабайтах, время ответа сетевого оборудования по ICMP в миллисекундах и текстовые значения ответов по статусу работы Blade-шасси.

Указанная разнородность вместе с большим объемом данных и является причиной невозможности решения задачи, основанного лишь на знаниях, навыках и умениях экспертов, занятых в сопровождении ИТ-инфраструктуры, на которой развернуты ИТ-сервисы ГВЦ ОАО «РЖД» [9].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Математическая постановка задачи определения контрольных значений метрик может быть представлена в следующем виде: для каждой метрики M_i , $i \in [1, m]$, необходимо определить контрольные значения K_i , которые позволяют однозначно разделить все множество значений метрики M_i на нормальные и аномальные (возможно выделение пограничного состояния).

Для этого требуется найти вектор $\vec{K} = (K_1, \dots, K_i, \dots, K_m)$ при условии:

$$\vec{K} \times \widehat{M} \rightarrow \vec{F},$$

где $\widehat{M} = (M_{ij})$ – матрица значений i -й метрики ($i \in [1, m]$) в j -й период времени ($j \in [1, n]$);

$\vec{F} = (F_1, \dots, F_j, \dots, F_n)$ – итоговое состояние сервиса, F_j – состояние сервиса для каждого j -го момента времени,

$$F_j = \begin{cases} 0; \\ 1, \end{cases}$$

где 0 – штатное состояние, 1 – сбой.

Рассматриваемая задача может быть решена классическими методами решения совместной системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} K_1 \times M_{11} + \dots + K_i \times M_{1i} + \dots + K_m \times M_{1m} = F_1; \\ \dots \\ K_1 \times M_{j1} + \dots + K_i \times M_{ji} + \dots + K_m \times M_{jm} = F_j; \\ \dots \\ K_1 \times M_{n1} + \dots + K_i \times M_{ni} + \dots + K_m \times M_{nm} = F_n. \end{cases}$$

В то же время эта задача может быть решена с помощью аппарата искусственных нейронных сетей [8]. Эти сети имеют различную структуру, каждая из которых в свою очередь имеет преимущества и недостатки для решения разного рода задач. Исходя из того, что в j -й момент времени дано значение метрик для всех предыдущих измерений и стоит задача оценки вероятности изменения итогового состояния ИТ-сервиса (отказ/деградация), можно говорить о задаче прогнозирования, т. е. о частном случае задачи регрессии. Для задач такого типа наиболее оправданным является применение нейронных сетей прямого распространения (персептронов) [10].

При этом количество слоев для сети прямого распространения и количество нейронов на каждом слое – это величины, от которых зависит, с одной стороны, скорость, с другой стороны качество обучения предложенной нейронной сети. Степень усложнения архитектуры сети и увеличения количества нейронов зависит в свою очередь от имеющихся ограничений по вычислительным мощностям.

В условиях деятельности ГВЦ ОАО «РЖД» не менее важным, чем качество расчетов коэффициентов K_i , является скорость данных расчетов, так как для данной задачи обязательно требуется организовать периодический пересчет модели с целью поддержания в актуальном состоянии.

Для достижения этой цели и снижения возможного негативного влияния на ИТ-сервисы, предоставляемые ГВЦ ОАО «РЖД» потребителям, процесс периодического обучения нейронной сети должен выполняться во время минимальной загрузки вычислительного комплекса, например в режиме ежесуточного переобучения в ночное (по московскому часовому поясу) время.

Сам процесс обучения должен выстраиваться в формате обучения с учителем – обучение посредством предъявления множества имеющихся примеров входных данных \widehat{M} и эталонных решений \vec{F} . Как сказано выше, эта задача по сути является задачей прогнозирования, для решения которой чаще всего применяется алгоритм обучения с обратным распространением ошибки. При этом его главным недостатком является слишком долгий процесс обучения, что делает его неприменимым для данной задачи. В настоящее время существует достаточно много более быстро работающих алгоритмов, таких как метод сопряженных градиентов, метод Левенберга–Маркара, RProp и др.

Для решения задачи остановим выбор на методе RProp (Resilient Propagation), известном как метод упругого распространения ошибки. Он превосходит стандартный метод обратного распространения ошибки в части длительности обучения, особенно с учетом разнородности имеющихся данных [11].

В начале обучения все весовые коэффициенты K_i устанавливаются случайным образом (малыми значениями, близкими к нулю) и далее при подаче примеров на вход итерационно проводится минимизация ошибки сети.

В процессе обучения с помощью алгоритма RProp используются знаки частных производных для подстройки весовых коэффициентов. Для каждого весового коэффициента K_i в цепочке для k -го нейрона вводится отдельное значение-модификатор Δ_{ik} , используемое для расчета размера корректировки соответствующего весового коэффициента.

Для определения величины коррекции на каждом шаге используется следующее правило:

$$\Delta_{ik}^j = \begin{cases} \eta^+ \Delta_{ik}^{(j-1)}, & \text{если } \frac{\partial E^{j-1} \partial E^j}{\partial K_{ik} \partial K_{ik}} > 0; \\ \eta^- \Delta_{ik}^{(j-1)}, & \text{если } \frac{\partial E^{j-1} \partial E^j}{\partial K_{ik} \partial K_{ik}} < 0, \end{cases}$$

где $0 < \eta^- < 1 < \eta^+$.

Конкретные значения модификаторов могут быть различными, однако чаще других используют предложенные в [12] и опробованные на множестве примеров значения:

$$\eta^- = 0,5; \quad \eta^+ = 1,2;$$

$\frac{\partial E^j}{\partial K_{ik}}$ – частная производная активационной функции по весовому коэффициенту в j -й момент времени.

Если на текущем шаге частная производная по соответствующему весу K_{ik} поменяла свой знак, это значит, что последнее изменение было большим и алгоритм перешагнул локальный минимум, следовательно, величину изменения необходимо уменьшить и вернуть предыдущее значение весового коэффициента – другими словами, необходимо произвести «откат». В случае сохранения своего знака производной значение-модификатор следует еще увеличить для ускорения сходимости.

После обновления значений модификаторов изменение самих коэффициентов происходит по правилу:

$$\Delta K_{ik} = \begin{cases} -\Delta_{ik}^j, & \text{если } \frac{\partial E^j}{\partial K_{ik}} > 0; \\ \Delta_{ik}^j, & \text{если } \frac{\partial E^j}{\partial K_{ik}} < 0; \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

$$K_{ik}^{j+1} = K_{ik}^j + \Delta K_{ik}^j.$$

Рассмотренный пример является подходящим вариантом построения сети и ее дальнейшего обучения

для поставленной задачи; становится ясен ключевой эффект применения рассмотренных технологий – первичное построение ресурсно-сервисной модели в оперативном режиме без привлечения эксперта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ключевой эффект применения рассмотренных технологий – первичное построение ресурсно-сервисной модели в оперативном режиме без привлечения эксперта.

Дальнейшие исследования, на наш взгляд, целесообразно продолжить в направлении детального выстраивания архитектуры нейронной сети для решения рассматриваемой задачи и использования имеющихся вычислительных мощностей для периодического переобучения нейронной сети на основе постоянно обновляемых обучающих выборок.

При этом вопрос эффективного использования вычислительного комплекса, а именно его динамически распределяемых ресурсов, должен строиться на принципах параллельной обработки расчетных заданий с использованием алгоритмов, применяемых в распределении работ для мультипроцессорных вычислительных систем [13].

Это позволит обеспечить построение адекватных моделей, не требующих существенных доработок блоком экспертов со стороны эксплуатации ИТ-сервисов, и поддержание их в актуальном состоянии, что в конечном счете обуславливает повышение качества оценки состояния ИТ-сервисов ГВЦ ОАО «РЖД» в режиме реального времени.

Дальнейшее развитие системы мониторинга должно строиться с учетом полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Концепция реализации комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога». – Москва, 2017. – 92 с.
2. Cukier K. A Revolution That Will Transform How We Live. / K. Cukier, V. Mayer-Schonberger – NY: Mariner Books, 2014. – 240 p.
3. Голубев А.С. Цифровая железная дорога – это реальность / А.С. Голубев, А.В. Скрябин // Евразия Вести. – 2017. – № 12.
4. Шардаков К.С. Сравнительный анализ популярных систем мониторинга сетевого оборудования, распространяемых по лицензии GPL / К.С. Шардаков, В.П. Бубнов // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2018. – № 1. – С. 44–48.
5. Охтилев М.Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. – Москва : Наука, 2006. – 410 с.
6. Supriya M. Monitoring and Evaluation in adaptation / M. Supriya, S. Truck, P. Davies. – Darwin, 2016. – 56 p.
7. Ayachitula N. IT service management automation – a hybrid methodology to integrate and orchestrate collaborative human centric and automation centric workflows / N. Ayachitula, M.J. Boco, Y. Diao, M. Surendra, R. Pavuluri, L. Shwartz, C. Ward // In IEEE SCC. – 2007. – Pp. 574–581.
8. Marcu P. Managing faults in the service delivery process of service provider coalitions / P. Marcu, L. Shwartz, G. Grabarnik, D. Loewenstern // In IEEE SCC, 2009. – Pp. 65–72.

9. Ортега Дж. Введение в параллельные и векторные решения линейных систем / Дж. Ортега в переводе Х. Д. Икрамова и И. Е. Капорина. – Москва : Мир, 1991. – 367 с.

10. Назаров А.В. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем / Назаров А.В., Лоскутов А.И. – Санкт-Петербург : Наука и техника, 2003. – 384 с.

11. Новиков П.А. Комплекс программ для навигации мобильных устройств внутри помещений с помощью нейронных сетей / П.А. Новиков, А.Д. Хомоненко, Е.Л. Яковлев // Информационно-управляющие системы. – 2016. – №1. – С. 32–39.

12. Riedmiller M. A Direct Adaptive Method for Faster Backpropagation Learning: The RPROP Algorithm / M. Riedmiller, H. Braun // In IEE, Conf. on Neural Networks. – San Francisco, 1993. – Pp. 586–591.

13. Молодкин И.А., Свистунов С.Г. Сравнительный анализ алгоритмов распределения работ в мультипроцессорных системах // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2018. – № 2. – С. 41–46.

About Algorithms for the Analysis and Processing of Data from IT-Services Monitoring Systems in Main Computer Centre JSC RZD

M.A. Bolshakov

St. Petersburg Information and Computing Center
JSC Russian Railways
St. Petersburg, Russia
bolshakovm@yandex.ru

S.V. Pugachev

Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University
St. Petersburg, Russia
nki-pugachev@yandex.ru

Abstract. Various instrumental monitoring systems of Zabbix, Nagios, ManageEngine OpManager, Hewlett Packard Operations Manager, Naumen Network Manager and IBM Tivoli it infrastructure are considered and compared. The functions to be performed by it infrastructure monitoring and management system in the target state are specified. The current state of it infrastructure monitoring system in Russian Railways is described. A mathematical formulation of the problem of determining control values of metrics and an example of developing a neural network to determine control values of metrics and recommendations for its improvement are given.

Keywords: monitoring, resource-service models, heterogeneous data, big data, neural network methods, parallel processing.

REFERENCES

1. The Concept of Implementation of the Complex Scientific and Technical Project «Digital Railway» [Konceptiya Realizacii Kompleksnogo Nauchno-tekhnicheskogo Proekta «Cifrovaya Zheleznaya Doroga»] – Russia, Moscow, 2017. – 92 p.
2. Cukier K. A Revolution That Will Transform How We Live / K. Cukier, V. Mayer-Schonberger – NY : Mariner Books, 2014. – 240 p.
3. Golubev A.S Digital Railway is Reality [Cifrovaya Zheleznaya Doroga – Eto Realnost / A.S. Golubev, A.V. Skryabin // Russia, Eurasia News. – 2017. – № 12.
4. Shardakov K.S. Comparative Analysis of the Popular Monitoring Systems for Network Equipment Distributed Under the GPL License [Sravnitelnyy Analiz Populyarnyh System Monitoring Setevogo Oborudovaniya Rasprostranyaemyh po Litsenzii GPL] / K.S. Shardakov, V.P. Bubnov // Russia, Intellectual Technologies on Transport. – 2018. – № 1. – P. 44–48.
5. Ohtilev M.YU. Intelligent Technologies for Monitoring and Control of Structural Dynamics of Complex Technical Objects [Intellektualnye Tekhnologii Monitoringa i Upravleniya Strukturnoj Dinamikoj Slozhnyh Tekhnicheskikh Obektov] / M.YU. Ohtilev, B.V. Sokolov, R.M. Yusupov. – Russia, Moscow : Scienc, 2006. – 410 p.
6. Supriya M. Monitoring and Evaluation in adaptation / M. Supriya, S. Truck, P. Davies. – Darwin, 2016. – 56 p.
7. Ayachitula N. IT Service Management Automation – a Hybrid Methodology to Integrate and Orchestrate Collaborative Human Centric and Automation Centric Workflows / N.Ayachitula, M. J. Bucu, Y. Diao, M. Surendra, R. Pavuluri, L. Shwartz, C. Ward // In IEEE SCC, 2007. – Pp. 574–581.
8. Marcu P. Managing Faults in the Service Delivery Process of Service Provider Coalitions / P. Marcu, L. Shwartz, G. Grabarnik, D. Loewenstern // In IEEE SCC, 2009. – Pp. 65–72.
9. Ortega J. Introduction to Parallel and Vector Solutions of Linear Systems [Vvedenie v Parallelnye i Vektornye Resheniya Linejnyh Sistem] / J. Ortega. – Russia, Moscow : World, 1991. – 367 p.
10. Nazarov A.V. Neural Network Algorithms of Forecasting and Optimization of Systems [Nejrosetevye Algoritmy Prognozirovaniya i Optimizacii Sistem] / A.V. Nazarov, A.I. Loskutov – Russia, Saint-Petersburg: Science and technique. – 2003. – 384 p.
11. Novikov P.A. Software for Mobile Indoor Navigation Using Neural Networks [Kompleks Program dlya Navigatzii Mobilnyh Ustroystv Vnutri Pomeschenii s Pomoshyu Neironnyh Setei] / P.A. Novikov, A.D. Khomonenko, E.L. Yakovlev // Russia, Information Management System. – 2016. – № 1. – Pp. 32–39.
12. Riedmiller M. A Direct Adaptive Method for Faster Backpropagation Learning: The RPROP Algorithm / M. Riedmiller, H. Braun // In IEE, Conf. on Neural Networks. San Francisco, 1993. – Pp. 586–591.
13. Molodkin I.A., Svistunov S.G. Comparative Analysis of Scheduling Algorithms in Multiprocessor Systems [Sravnitelnyy Analiz Algoritmov Raspredeleniya Rabot v Multiprocessornyh Systemah] // Russia, Intellectual Technologies on Transport. – 2018. – № 2. – Pp. 41–46.

Онтологическая модель системы предупреждения аварийных ситуаций на основе поведения водителя в кабине транспортного средства

И.Б. Лашков
СПИИРАН
Санкт-Петербург, Россия
igla@iias.spb.su

А.М. Кашевник
Университет ИТМО
Санкт-Петербург, Россия
alexey@iias.spb.su

Аннотация. Рассматриваются вопросы создания систем активной безопасности, позволяющих снизить вероятность возникновения дорожно-транспортного происшествия. Такие системы ограничены в возможностях персонализации работы системы для водителя, а также использовании контекста и генерации рекомендаций для принятия им мер по предотвращению аварийной ситуации. Решение этой задачи лежит в основе создания системы предупреждения аварийных ситуаций с помощью мониторинга поведения водителя транспортного средства. В статье предложена онтологическая модель, построенная на основе данных о предметной области, позволяющая формализовать описание дорожной ситуации, в которой находится водитель транспортного средства в некоторый момент времени. Такая модель позволит учитывать данные о самом водителе, транспортном средстве, контексте, опасных состояниях и рекомендациях. Онтологическая модель послужит основой создания систем предупреждения аварийных ситуаций, ориентированных на мониторинг поведения водителя в кабине транспортного средства во время его движения.

Ключевые слова: онтологическая модель, сценарная модель, водитель, сенсоры, транспортное средство, аварийная ситуация, опасное состояние, система активной безопасности, контекст, рекомендации.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно отчетам Госавтоинспекции МВД [1], на территории России за 2017 г. произошло около 170 тыс. дорожно-транспортных происшествий, в результате которых погибло 20 тыс. чел. и более 200 тыс. человек было ранено. Несмотря на уменьшение показателей аварийности в сравнении с аналогичным периодом прошлого года, абсолютные цифры дорожных происшествий остаются высокими. По статистике, больше половины дорожных происшествий происходит в результате человеческого фактора. Количество ДТП, вызванных состоянием усталости [2] или ослабленного внимания [3] водителя за рулём транспортного средства (далее – ТС), с каждым годом растет и приводит к травматизму среди населения во всем мире.

В качестве решения этой проблемы научным сообществом предложен подход к разработке систем активной

безопасности [4], направленных на предотвращение аварийных ситуаций на основе мониторинга поведения водителя ТС и его своевременного оповещения о текущей ситуации за счет генерации уведомлений.

Технологии, составляющие системы повышения безопасности водителя, могут быть условно разделены по виду контекста на те, которые осуществляют мониторинг окружающей обстановки (дорожной обстановки), и те, которые направлены на слежение за поведением водителя [5] в кабине транспортного средства. В качестве контекста используется любая информация, которая является релевантной при описании ситуации, в которой находится некоторый объект (водитель, ТС) в определенный момент времени. Исходя из того, что основные направления в системах активной безопасности связаны с мониторингом окружающей обстановки вокруг автомобиля, основной фокус статьи направлен на анализ поведения водителя в кабине транспортного средства для выявления признаков его опасного поведения.

Как правило, создание системы активной безопасности [6] подразумевает использование системы телеметрии [7], предоставляющей показания с встроенных в транспортное средство камер видеонаблюдения, сенсоров, радаров с целью их дальнейшего анализа; информационно-развлекательной системы, отвечающей за отображение актуальной информации о поездке для водителя; системы повышения безопасности, осуществляющей мониторинг поведения водителя [8]. В качестве дополнительного компонента системы может использоваться удаленный сервис, отвечающий за адаптацию системы к поведению водителя, а также анализ накапливаемой статистики управления ТС для страховых компаний или автопарков.

В статье предложена сценарная модель системы предупреждения аварийных ситуаций на основе мониторинга поведения водителя за счет начального определения основных сценариев использования системы, описывающих цели, действия лиц в системе, а также онтологическая модель, позволяющая объединить и сопоставить знания о предметной области и обеспечить поддержку сценариев работы системы.

В настоящее время технологии повышения безопасности и комфорта вождения, составляющие системы активной безопасности для автомобилей, основаны на считывании и обработке данных с датчиков, радаров, лидаров, видеокамер в комплексе. Таким образом, целесообразно рассмотреть основные технологические подходы, которые находят применение в создании систем активной безопасности, нацеленных на мониторинг поведения водителя в кабине транспортного средства.

ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ СИСТЕМ АКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

По способу функционирования системы активной безопасности условно разделены на современные системы содействия водителю, существующие в виде аппаратно-программных комплексов и устанавливаемые на заводах автопроизводителей; мобильные системы генерации рекомендаций, разрабатываемые на основе программных решений в виде мобильных приложений [9]; устройства видеонаблюдения, устанавливаемые в кабине ТС и осуществляющие слежение за дорогой или водителем; устройства носимой электроники, носимые водителем во время вождения.

Общими недостатками для этих категорий систем являются ограничения, связанные с невозможностью адаптации индивидуально для водителя и отсутствием выработки контекстно ориентированных рекомендаций. Использование алгоритмов персонализации к стилю вождения водителя позволит расширить возможности существующих решений на базе мобильных систем генерации рекомендаций и выделить отдельный класс систем предупреждения аварийных ситуаций [10], учитывающих информацию о профиле водителя, ТС, контекст, предыдущий опыт использования системы.

Внедрение системы предупреждения аварийных ситуаций на транспортном предприятии способно повысить эффективность использования транспортных средств и снизить эксплуатационные расходы всего предприятия. На основе рассмотренных решений и публикаций [11] в области систем активной безопасности все устройства и программные методы, применяемые при построении подобных систем, можно разделить на две отдельные группы: направленные на мониторинг поведения водителя в кабине ТС и предназначенные для слежения за дорожной ситуацией вокруг автомобиля. Ввиду недостаточной проработанности мониторинга поведения водителя в кабине транспортного средства основной акцент в статье сделан на анализ взаимодействия водителя с транспортным средством.

Среди технических устройств, специально разработанных и применяемых в процессе вождения в кабине автомобиля для выявления признаков ослабленного внимания или усталости водителя, можно выделить: средства носимой электроники (например, кепка, браслет) [12], измеряющие состояние водителя при помощи таких физиологических показателей, как пульс, частота дыхания, электроэнцефалография [13], электродермальная активность кожи [14] и т. д.; видеокамеры, направленные на лицо водителя и анализирующие его состояние по лицевым характеристикам, к которым можно отнести поворот и наклон головы, частоту моргания век, закрытость глаз и т. д.

Видеокамеры, устанавливаемые внутри кабины транспортного средства и осуществляющие непрерывный мониторинг поведения водителя, широко используются системами активной безопасности для извлечения (захвата) отдельных кадров изображений лица водителя с некоторой заданной частотой (например, 20 кадров в секунду), которые в дальнейшем используются при цифровой предобработке изображения и непосредственном распознавании тех или иных объектов (по положению головы, чертам лица) и их характеристик (определение размера области и цвета объекта, расстояние до объекта, глубина объекта и т.д.) в определенный момент времени. Специализированные программные интерфейсы и алгоритмы, фронтальные камеры, устанавливаемые в смартфонах, также позволяют получить непрерывный ряд изображений, которые могут быть использованы при компьютерной обработке и детектировании лица водителя. Рассмотрим несколько подходов к распознаванию лиц, каждый из которых обладает как преимуществами, так и недостатками.

На сегодняшний день технология распознавания лиц [15, 16], часто используемая в системах активной безопасности, является одним из популярных и развиваемых направлений компьютерного зрения. Использование видеокамер при построении систем безопасности подразумевает применение методов компьютерной обработки изображений водителя с целью определения присутствия объекта на изображении, нахождения его положения в системе координат пикселей исходного изображения и распознавания. В зависимости от выбора алгоритма распознавания положение объекта может быть определено координатами прямоугольника, ограничивающими объект, контуром этого объекта или координатами точек, наиболее характерных для объекта. Стоит отметить, что в первую очередь алгоритмы поиска объектов на изображениях должны хорошо справляться с нахождением лиц людей и черт лица. Широко распространенные методы распознавания лиц на изображениях можно условно разделить на две группы: методы, использующие в своей работе некоторый заданный набор правил для обнаружения лица на изображении (сравнение с эталоном — *Template matching*, например, метод Виолы–Джонса [17]) и метод, использующий вектор признаков для дальнейшей классификации изображения на классы (модели внешнего вида (*Appearance Models*, ААМ), включающие в себя такие методы, как скрытые марковские модели (*Hidden Markov Model*, НММ) [18], нейронные сети, линейный дискриминантный анализ и т. д.). Рассмотрим несколько методов каждой из этих категорий.

Одним из распространенных методов поиска объектов на изображении является алгоритм Виолы–Джонса, изначально предназначенный для поиска лиц на изображениях в режиме реального времени. В своей работе алгоритм использует принцип сканирования скользящим «окном» для поиска лица и черт лица человека. Среди существующих методов обнаружения объектов на изображениях метод Виолы–Джонса показывает один из лучших результатов по соотношению показателей эффективности распознавания и скорости работы, при этом обладает низкой вероятностью ложного обнаружения лица. Среди недостатков можно отметить, что данный метод накладывает определенные ограничения на пространственное положение лица и степень его освещенности. Алгоритм хорошо распознает черты лица человека только при небольшом

угле обзора, не превышающем 30 градусов. При угле наклона более 30 градусов процент обнаружений резко падает, что не дает возможности распознавать лицо человека при произвольном угле поворота.

Другим распространенным методом обнаружения объектов является применение нейронных сетей [19]. Отличительной особенностью нейронной сети является ее обучаемость, которая позволяет с высокой эффективностью решать поставленную задачу. Обучение нейронной сети происходит на некоторой выборке с помощью готовых примеров. В ходе обучения выделяются ключевые признаки и формируются взаимосвязи между ними. В дальнейшем обученная нейронная сеть позволяет распознать ранее неизвестный ей объект, применив полученный в процессе обучения опыт. Сверточная нейронная сеть показывает наилучшие результаты в области распознавания, но считается наиболее сложной для реализации. Такие особенности сети, как общие веса (определение лица в любом месте на изображении), локальные рецепторные поля обеспечивают устойчивость к различным искажениям (смещение, изменение масштаба и т. д.). Одним из преимуществ применения такого метода является возможность обработки лицевых структур при различном угле наклона относительно вертикальной оси. В то же время метод имеет ряд существенных недостатков, одним из которых является ложное обнаружение объектов, отдаленно напоминающих лицо человека.

Обнаружение лица человека на изображении может выполняться другим адаптивным методом – опорных векторов (Support Vector Machine – SVM) [20]. Метод опорных векторов рассматривает каждое изображение как точку в n -мерном пространстве, где n соответствует размерности данных или общему числу пикселей изображения. Каждая из этих точек принадлежит к некоторому классу. Основной задачей SVM является поиск плоскости, расстояние до которой от ближайшей точки максимально в пределах множества вариантов, и соответствующего ей оптимального классификатора. В сравнении с обученной нейронной сетью, требующей незначительного количества вычислительных ресурсов, время работы SVM-алгоритма может существенно увеличиться в случае, если число векторов значительно превышает размер выборки. К преимуществам метода можно отнести сравнительно небольшое время обучения и высокую точность распознавания лиц на изображениях.

Основными трудностями, возникающими при распознавании лиц на изображениях, являются пространственные характеристики положения лица и его масштаб, количество лиц на изображении, разрешение изображения, возможные искусственные помехи на лице (например, очки, макияж, маска и т. д.), условия освещенности, тени и отражение от окружающих объектов. Алгоритмы детектирования лицевых характеристик водителя находят применение в существующих системах активной безопасности. Стоит отметить, что использование таких алгоритмов в комплексе с другими способами распознавания опасного поведения водителя за рулем позволяет повысить точность детектирования опасных состояний и общую эффективность системы в целом.

Другим подходом к детектированию небезопасного вождения автомобиля является такой, который подразумевает считывание, накопление и анализ сенсорных дан-

ных со встроенных в автомобиль датчиков, включая радары, лидары, лазеры. В таком случае основные исследования и технологические решения сосредоточены на применении различных алгоритмов машинного обучения и подходов к работе с накапливаемой статистикой вождения с целью анализа паттернов поведения водителей и оценки их стиля управления ТС. Примерами реализации таких систем служат как системы телеметрии, встраиваемые в ТС на этапе их производства, так и мобильные приложения, использующие ряд встроенных в смартфон сенсоров.

Подходы, основанные на классификации водителей и вычислении их стиля вождения, используют в своей работе широкий спектр алгоритмов, включая: DTW (динамическая трансформация временной шкалы) [21], определяющий отношение между временными последовательностями; принципы нечеткой логики [22] на основе правил; методы кластеризации [23], классифицирующие водителей со схожими характеристиками управления ТС, SVM, НММ, и другие. Стоит отметить, что накапливаемая статистика вождения позволяет выполнить прогноз некоторой дорожной ситуации и заранее предупредить водителя о вероятности возникновения аварийной ситуации.

При обнаружении вероятности возникновения аварийной ситуации системы активной безопасности задействуют ряд технических методов с целью оповещения и предупреждения водителя о необходимости предпринять ряд мер во избежание аварийной ситуации. В качестве примера: система контроля уровня усталости водителя является одной из технологий, использующих в своей работе методы компьютерной обработки и анализа изображений. На основе контроля процесса движения и угла поворота рулевого колеса данная система способна заблаговременно распознавать признаки возникновения у водителя усталости или ослабленного внимания и подавать ему сигнал о необходимости сделать перерыв для отдыха.

По уровню и силе восприятия все меры помощи водителю можно разделить на три категории: информационные (например, предупредительный звуковой сигнал), вспомогательные (например, изменение силы продавливания педали акселератора) и частичное или полное вмешательство в управление ТС системой активной безопасности (например, уменьшение впрыска топлива при превышении определенной скорости). Использование тех или иных мер предупреждения и предотвращения аварийной ситуации помогает не допустить возникновения ДТП.

Несмотря на то, что системы активной безопасности, ориентированные на заблаговременное обнаружение и предупреждение водителя о наступлении дорожных происшествий, набирают популярность и распространенность среди большого количества автопроизводителей, информация о данной категории систем в разной степени открыта и распределена между разработчиками таких систем. Таким образом, с целью объединения и формализации данных, поступающих от систем активной безопасности, и обеспечения выполнения сценариев использования системы предполагается разработать сценарную и онтологическую модели. Одним из ключевых преимуществ использования онтологий [24] является системный подход к описанию предметной области, в которой концептам и связям даны уникальные имена и определения.

СЦЕНАРНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ
АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

На основе рассмотренных подходов к разработке систем активной безопасности определены и описаны следующим образом четыре варианта использования системы различными действующими лицами (рис. 1), участвующими в процессе взаимодействия с системой.

Вариант использования системы водителем с личным ТС. Данный вариант подразумевает использование системы при вождении частными водителями, управляющими собственным (личным) ТС (рис. 1). Преимуществами такого взаимодействия является стремление водителя к повышению собственной безопасности за рулем транспортного средства за счет реагирования на генерируемые рекомендации, учитывающие контекст, а также повышение навыков вождения.

Вариант использования системы администратором автопарка. Несмотря на то, что дорожные аварии по вине грузового автотранспорта происходят гораздо реже, чем по вине легковых автомобилей, смертность в ДТП с грузовыми автомобилями остается крайне высокой. Среди факторов, вызывающих снижение бдительности водителя и, как следствие, приводящих к происшествиям с участием грузового автотранспорта, можно выделить такие: плотные рабочие графики, неверно спланированный маршрут или проявление торопливости со стороны работодателя или заказчика. В этом случае подобные системы предупреждения аварийных ситуаций могут с легкостью найти применение в логистических компаниях, выполняющих грузовые перевозки (см. рис. 1).

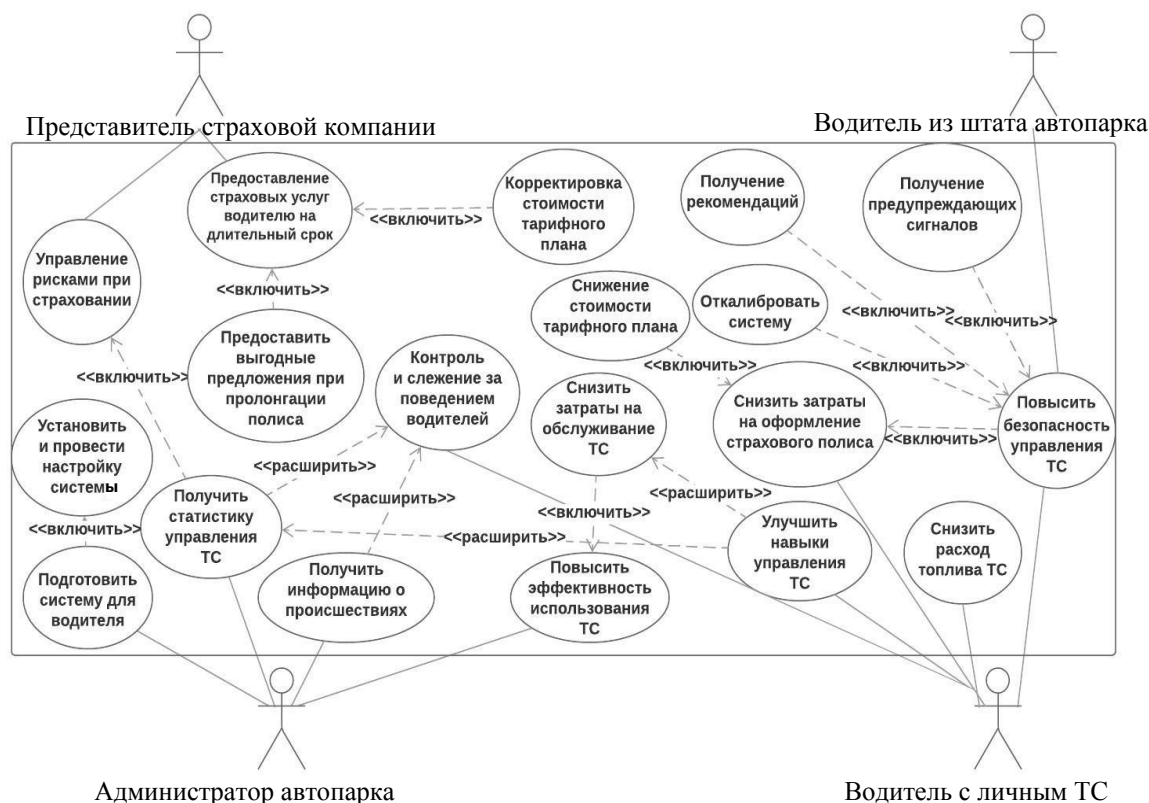


Рис. 1. Сценарная модель системы предупреждения аварийных ситуаций

Другой сферой применения системы являются таксомоторные компании, осуществляющие пассажирские перевозки. Предлагаемый вариант подразумевает мониторинг осуществляемых поездок администратором автопарка и использование системы генерации рекомендаций штатными водителями автопарка. Преимуществами данного варианта является обеспечение контроля выполнения рабочего графика и учет труда и отдыха водителями из штата при непрерывном отслеживании местонахождения каждого из них, а также их психофизиологического состояния.

Вариант использования системы страховой компанией. Принцип Usage Based Insurance («Страхование на основе фактического использования») (UBI) [25] был введен

на рынок моторных ТС еще 10 лет назад. Вместо того чтобы рассчитывать стоимость страхового полиса на основе марки и модели автомобиля, стажа водителя, его возраста и истории вождения, принцип UBI описывает модель, согласно которой риск вычисляется в зависимости от индивидуального стиля вождения водителя на основе различных параметров (например, время использования, пройденное расстояние, скорость движения, опасные маневры, поведение водителя и места поездок). На текущий момент различают два вида моделей UBI: Pay As You Drive (PAYD) и Pay How You Drive (PHYD). Если в первом случае страховой взнос зависит от пробега, пройденного транспортным средством за время действия страхового полиса, то во втором стоимость полиса рассчитыва-

ется на основе данных о стиле вождения водителя (например, резкость ускорения или торможения). При этом страховые компании все чаще применяют технику РНУД в области автострахования, в результате работы которой проводится анализ поведения водителя за рулем ТС и динамически рассчитывается стоимость страхования транспортного средства при последующем оформлении.

Для применения подобной техники страховые компании задействуют либо телеметрическое оборудование, подключаемое, как правило, через диагностический порт ТС, или смартфон водителя с установленным на нем соответствующим мобильным приложением. В процессе эксплуатации ТС за счет анализа сведений, полученных с сенсоров (например, акселерометра, гироскопа, GPS), о стиле вождения водителя страховая компания предоставляет возможность скорректировать тарифный план страхования ТС. В этом случае с целью «поощрения» водителей страховыми компаниями могут применяться некоторые из следующих программ: выгодное предложение при пролонгации полиса (окончание срока страхования), снижение стоимости тарифного плана при оформлении полиса и использовании телеметрического оборудования. Преимуществом применения такого сценария (рис. 1) является стремление страховых компаний снизить риски при страховании на основе анализа показателей вождения водителя и таким образом повысить безопасность дорожного движения, снизить расходы на оформление страховых полисов для водителей и, как результат, привлечь больше клиентов.

ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Процессы формирования контекстно зависимых решений модулем выявления и предупреждения опасных состояний в процессе вождения и осуществления персонализации системы для водителя требуют обеспечения формализации описания текущей ситуации в кабине транспортного средства.

С целью поддержки сформированных сценариев использования системы предупреждения аварийных ситуаций предлагается онтологическая модель, построенная на основе знаний о следующих объектах при помощи четырех высокоуровневых классов: «Водитель» (поведение водителя в кабине ТС), «ТС» (характеристики управления транспортным средством), «Смартфон» (смартфон водителя, объединяющий в себе фронтальную камеру и сенсоры и используемый для обеспечения детектирования опасных состояний водителя) и «ОпасныеСостояния» (состояния усталости и ослабленного внимания, с которыми водитель может столкнуться при управлении транспортным средством). Данная онтологическая модель ориентирована на достижение следующих задач: выявление опасных состояний водителя на основе наблюдаемых и обработанных параметров с фронтальной камеры и сенсоров смартфона; генерация рекомендаций на основе определенных опасных состояний для предотвращения наступления дорожно-транспортных происшествий. Общая схема онтологической модели системы представлена на рис. 2.

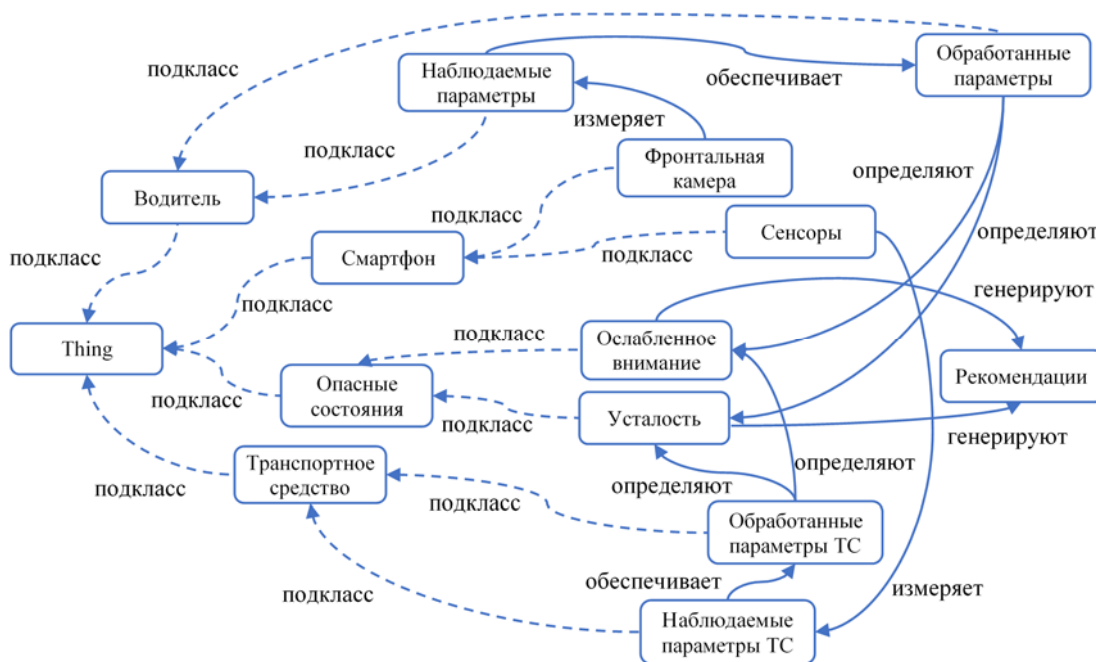


Рис. 2. Онтологическая модель системы предупреждения аварийных ситуаций

Онтологическая модель позволяет сопоставить наблюдаемые сигналы поведения водителя и опасные состояния, с которыми он может столкнуться при управлении ТС. Понятие «Водитель» характеризуется и формируется на основе наблюдаемых (класс «НаблюдаемыеПараметры-

Водителя») параметров, непосредственно считываемых с фронтальной камеры (класс «ФронтальнаяКамера») и обработанных (класс «ОбработанныеПараметрыВодителя») параметров в поведении водителя. Наблюдаемые параметры являются первичными значениями с фронтальной

камеры смартфона, которые проходят предварительную обработку, и описывают первые характеристики водителя, включая (отношение «являются») в себя такие объекты, как «ГлазаОткрыты», «ГлазаЗакрыты», «СтепеньОткрытостиРта» и «ПоложениеГоловы». На основе распознанных лицевых характеристик система предупреждения аварийных ситуаций вычисляет (обработанные) параметры, представляющие собой предобработанные сведения о водителе в кабине ТС и используемые в дальнейшем для выявления возможных опасных состояний. К обработанным параметрам относятся (отношение «являются») такие визуальные объекты, как «PERCLOS» [26] (доля времени, в течение которого глаза закрыты), «ЧастотаМорганияВек» (частота смыкания век в течение времени), «ПродолжительностьМорганияВек» (время мигания век), «ПоворотГоловы» (угол поворота головы водителя влево/вправо), «Зевота» (отношение высоты и ширины рта водителя) и «НаклонГоловы» (угол наклона головы водителя вперед/назад).

Другим составляющим классом онтологической модели является «ТС», включающий (отношение «являются») различные параметры и атрибуты управления ТС водителем, формирующиеся на основе наблюдаемых («НаблюдаемыеПараметрыТС») и обработанных («ОбработанныеПараметрыТС») характеристик движения. Наблюдаемые параметры являются первичными значениями, формирующимися при помощи получаемых данных с сенсоров (класс «Сенсоры»), объединяющий (отношение «являются») в себе объекты «Акселерометр» (датчик, измеряющий ускорение и скорость ТС), «Магнитометр» (датчик, измеряющий направление движения ТС), «Гироскоп» (датчик, измеряющий положение ТС в пространстве), «GPS» (датчик, используемый при получении текущей скорости и географического местоположения), «Микрофон» (датчик, вычисляющий уровень звукового сигнала извне), «ДатчикОсвещенности» (датчик, измеряющий уровень освещенности в кабине ТС), каждый из которых соответствует одноименному сенсору) смартфона, включая следующие параметры: «ЛинейноеУскорение», «СкоростьДвижения», «УровеньШумаВКабинеТС», «НаправлениеДвиженияТС», «КоординатыМестоположения» и «СтепеньОсвещенностиВКабинеТС». На основе анализа характеристик движения ТС система предупреждения аварийных ситуаций переходит к обработанным параметрам, используемым при выявлении опасных состояний, а именно: «ПоворотТС» (угол поворота ТС, вычисляемый на основе измерений с гироскопа), «УскорениеТС» и «ТорможениеТС» (ускорение и торможение ТС, определяемое при помощи данных с акселерометра), «ПолнаяОстановкаТС» (остановка ТС фиксируется при скорости движения 0 км/ч), «СредняяСкоростьДвижения-НаУчастке» (определяется на основе данных с GPS и акселерометра), «ГеографическоеМестоположение» и «ГолосЧеловека» (определение присутствия других людей в кабине ТС помимо водителя по входному аудиосигналу с микрофона). На основе обработанных параметров, описывающих поведение водителя и характеристики движения ТС, система предупреждения аварийных ситуаций принимает решение о присутствии или отсутствии признаков опасного состояния у водителя («ОпасныеСостояния»), к которым относятся (отношение «являются») усталость

(объект «Усталость») и ослабленное внимание (объект «ОслабленноеВнимание»).

Результаты распознавания опасного состояния водителя являются начальной точкой входа для предупреждения водителя и выработки для него контекстно ориентированных рекомендаций. Для оповещения водителя об опасном состоянии и генерации рекомендаций системой предупреждения аварийных ситуаций задействуются информационные оповещения (класс «ИнформационныеОповещения»), включающие (отношение «являются») такие виды уведомлений смартфона, как вибрация (колебания) (класс «Вибрация»), текстовое сообщение (например, отображение на дисплее смартфона) (класс «ТекстовоеСообщение») и звуковое уведомление (например, при помощи динамика смартфона) (класс «ЗвуковоеУведомление»). При обнаружении признаков состояния усталости у водителя ему генерируются (отношение «являются») следующие рекомендации (класс «Рекомендации»): выключить радио или музыку, съехать на обочину и отдохнуть или закончить разговор. В случае определения признаков состояния ослабленного внимания у водителя ему предлагаются (отношение «являются») следующие рекомендации: съехать на обочину и отдохнуть, включить радио или музыку, выпить тонизирующий напиток (кофе), начать разговор с пассажиром, напеть мелодию или проветрить салон ТС.

Применение разработанной онтологической модели дает возможность определить метаданные модели предметной области и функциональные возможности системы предупреждения об аварийных ситуациях. Предложенная модель позволит не только достичь семантической интероперабельности во взаимодействии отдельных компонентов в системе, но и при необходимости вносить изменения в ее поведение, не перепрограммируя составляющие ее компоненты и модули.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа подходов к созданию систем активной безопасности разработана сценарная модель, объединившая возможные сценарии использования системы предупреждения аварийных ситуаций на основе поведения водителя в кабине транспортного средства, ориентированные на получение контекстно-ориентированных персонализированных рекомендаций, мониторинг и анализ поездок водителей. В качестве лиц, осуществляющих взаимодействие с системой, выделены водитель с личным транспортным средством, водитель из штата и администратор автопарка, а также представитель страховой компании. Разработанная сценарная модель послужила основой для создания онтологической модели, отличающейся комплексным накоплением и анализом статической и динамической информации о водителе, транспортном средстве, опасных состояниях и смартфоне. Такая модель позволяет сопоставить наблюдаемые и обработанные параметры поведения водителя, характеристики управления транспортным средством и опасные состояния, с которыми водитель может столкнуться при вождении. Онтологическая модель дает возможность объединить эти знания для выработки рекомендаций водителю на основе информации об опасном состоянии и контексте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения. URL: <https://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 21.11.2018).

2. Teff B.C. Acute Sleep Deprivation and Risk of Motor Vehicle Crash Involvement // Report, Washington, DC 20005, AAAFoundation.org, December 2016. – 21 p.

3. National Center for Statistics and Analysis. Distracted Driving: 2016 // Traffic Safety Facts Research Note. Report No. DOT HS 812 517, Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration. – April 2018. – 6 p.

4. Современные системы активной безопасности автотранспортных средств (САБ АТС) и перспективы их совершенствования / И.С. Сазонов, В.А. Ким, В.Д. Рогожин, А.М. Михайлюк // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Международной научно-технической конференции. – 2005. – С. 265–266.

5. A study on the causes of rear-end collision based on an analysis of driver behavior / N. Kuge, H. Ueno, H. Ichikawa, K. Ochiai // JSAE Review. – 1995. – Vol. 16. – no. 1. – P. 55–60.

6. Зайнеев И.Р., Ерхова О.А. Основные компоненты обеспечения системы активной безопасности современного автомобиля // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2016. – Т. 4. 5–3 (25–3) – С. 236–241.

7. CarTel: A Distributed mobile sensor computing system / V. Bychkovsky, K. Chen, M. Goraczko, H. Hu, B. Hull, A. Miu, E. Shih, Y. Zhang, H. Balakrishnan, S. Madden // InSenSys'06. – 2006. – P. 383–384.

8. Smartphone-Based Identification of Dangerous Driving Situations: Algorithms and Implementation / A.V. Smirnov, A.M. Kashevnik, I. Lashkov, O. Baraniuc, V. Parfenov // Proceedings of the 18th Conference of Open Innovations Association FRUCT. – 2016. – P. 306–313.

9. Комплекс программ для навигации мобильных устройств внутри помещений с помощью нейронных сетей / П.А. Новиков, А.Д. Хомоненко, Е.Л. Яковлев // Информационно-управляющие системы. – 2016. – № 1 (80). – С. 32–39.

10. Context-Based Driver Support System Development: Methodology and Case Study / A. Kashevnik, I. Lashkov, V. Parfenov, N.G. Mustafin, O. Baraniuc // Proceedings of the 21st Conference of Open Innovations Association FRUCT. – 2017. – P. 162–171.

11. Kutila M. Methods for Machine Vision Based Driver Monitoring Applications // VTT publication series 621. – 2006. – 82 p.

12. Комплексная система мониторинга состояния водителя в рейсе / В.В. Дементенко, И.И. Иванов, Д.В. Макаев // Современные проблемы безопасности жизнедеятель-

ности: интеллектуальные транспортные системы : материалы IV Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 191–195.

13. Система мониторинга состояния водителя и безопасность на автомобильном транспорте / Т.Ф. Щербакова, С.С. Седов, И.А. Киртаев, А.М. Вафин // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2016. – С. 763–768.

14. Boucsein W. Electrodermal Activity // Springer Science & Business Media. – Vol. 2. – 2012. – 618 p.

15. Кухарев Г.А., Щеголева Н.Л. Системы распознавания человека по изображению лица. – СПб. : ЛЭТИ, 2006. – 175 с.

16. Локализация контуров объектов на изображениях при вариациях масштаба с использованием преобразования Хафа / В.А. Фурсов, С.А. Бибииков, П.Ю. Якимов // Компьютерная оптика. – 2013. – 37(4). С. 496–502.

17. Viola P., Jones M. Robust Real-time Object Detection // International Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 57, no. 2. – P. 137–154.

18. Rabiner L.R. A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition // Proceedings of the IEEE. – Vol. 77, no. 2. – 1989. – P. 257–286.

19. Neural network-based face detection / H. Rowley, S. Baluja, T. Kanade // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1998. – Vol. 20. – P. 22–38.

20. Suykens J., Vandewalle J. Least Squares Support Vector Machine Classifiers // Neural Processing Letters. – 1999. – Vol. 9. Issue 3. – P. 293–300.

21. Detecting driving events using smartphone / C. Saiprasert, T. Pholprasit, W. Pattara-Atikom // Proceedings of the 20th ITS World Congress. – 2013. – 11 p.

22. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. – Vol. 8, Issue 3. – Pp. 338–353.

23. Kalsoom R., Halim Z. Clustering the driving features based on data streams // Proceedings of the 2013 16th International Multi Topic Conference, Lahore, Pakistan. – 2013. – Pp. 89–94.

24. Построение модели данных для системы моделирования сетевых атак на основе онтологического подхода / И.В. Котенко, О.В. Полубелова, А.А. Чечулин // Труды СПИИРАН. – Вып. 3 (26). – С. 26–39.

25. Telematics System in Usage Based Motor Insurance / S. Husnjaka, D. Peraković, I. Forenbacher, M. Mumdziev // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 100. – P. 816–825.

26. Wierville W. Overview of research on driver drowsiness definition and driver drowsiness detection // Proceedings of the fourteenth international technical conference on enhanced safety of vehicles. – Munich, 1995. – Pp. 462–470.

An Ontology Model for Dangerous Situation Prevention Based on the In-cabin Driver Analysis

I.B. Lashkov
SPIIRAS
St. Petersburg, Russia
igla@iias.spb.su

A.M. Kashevnik
ITMO University
St. Petersburg, Russia
alexey@iias.spb.su

Abstract. Active safety systems are aimed at improving driver safety and reducing the probability of the traffic accident. Basically, existing active safety systems are limited in adaptation system for a driver, as well as in the use of context and generation of the context-relevant recommendations for taking actions to prevent a traffic accident. To solve this problem, it is proposed to develop the dangerous situation prevention system. Considering this type of systems, the paper presents an ontology model based on the problem domain of the active safety systems and allows to formalize the description of the road situation that can describe the vehicle driver. The model considers the information about driver, vehicle, context, dangerous situations and recommendations. The proposed ontology model will serve as the basis for the creation of the dangerous situation prevention systems focused on monitoring driver behavior.

Keywords: ontology model, scenario model, driver, sensors, vehicle, emergency situation, dangerous state, active safety system, context, recommendations.

REFERENCES

1. Information on road safety indicators [Svedeniya o pokazatelyakh sostoyaniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya]. Available at: <https://stat.gibdd.ru/> (accessed 21 November 2018).
2. Teff B.C. Acute Sleep Deprivation and Risk of Motor Vehicle Crash Involvement. *Report, Washington, DC 20005, AAAFoundation.org*, 2016. – 21 p.
3. National Center for Statistics and Analysis. Distracted Driving: 2016. Traffic Safety Facts Research Note. Report No. DOT HS 812 517, *Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration*, 2018. – 6 p.
4. Modern vehicle active safety systems and prospects for its improvement [Sovremennye sistemy aktivnoy bezopasnosti avtotransportnykh sredstv (SAB ATS) i perspektivy ikh sovershenstvovaniya] / I.S. Sazonov, V.A. Kim, V.D. Rogozhin, A.M. Mikhaylyuk // *Materials, equipment and resource-saving technologies. Materials of the international scientific and technical conference [Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii]*, 2005, pp. 265–266.
5. A study on the causes of rear-end collision based on an analysis of driver behavior / N. Kuge, H. Ueno, H. Ichikawa, K. Ochiai // *JSAE Review*, 1995, vol. 16, no. 1, pp. 55–60.
6. Zayneev I.R., Erkhova O.A. The main components of the active safety system of a modern car [Osnovnye komponenty obespecheniya sistemy aktivnoy bezopasnosti sovremennogo avtomobilya]. *Current research areas of the XXI century: theory and practice [Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika]*, vol. 4, 2016, pp. 236–241.
7. CarTel: A Distributed mobile sensor computing system / V. Bychkovsky, K. Chen, M. Goraczko, H. Hu, B. Hull, A. Miu, E. Shih, Y. Zhang, H. Balakrishnan, S. Madden // *InSenSys'06*, 2006, pp. 383–384.
8. Smartphone-Based Identification of Dangerous Driving Situations: Algorithms and Implementation / A.V. Smirnov, A.M. Kashevnik, I. Lashkov, O. Baraniuc, V. Parfenov // *Proceedings of the 18th Conference of Open Innovations Association FRUCT*, 2016. – Pp. 306–313.
9. Complex of programs for navigation of mobile devices indoors using neural networks [Kompleks programm dlya navigatsii mobil'nykh ustroystv vnutri pomeshcheniy s pomoshch'yu neyronnykh setey] / P.A. Novikov, A.D. Khomonenko, E.L. Yakovlev // *Information and Control Systems [Informatsionno-upravlyayushchie sistemy]*, 2016, 1 (80), pp. 32–39.
10. Context-Based Driver Support System Development: Methodology and Case Study / A. Kashevnik, I. Lashkov, V. Parfenov, N.G. Mustafin, O. Baraniuc // *Proceedings of the 21st Conference of Open Innovations Association FRUCT*, 2017, pp. 162–171.
11. Kutila M. Methods for Machine Vision Based Driver Monitoring Applications. *VTT publication series 621*, 2006. – 82 p.
12. A comprehensive system for monitoring driver state in the trip [Kompleksnaya sistema monitoringa sostoyaniya voditelya v reyse] / V.V. Dementienko, I.I. Ivanov, D.V. Makaev // *Modern problems of life safety: intelligent transportation systems. Proceedings of the IV international scientific-practical conference [Sovremennye problemy bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: intellektual'nye transportnye sistemy. Materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii]*, 2016, pp. 191–195.
13. Driver state monitoring system and vehicle safety [Sistema monitoringa sostoyaniya voditelya i bezopasnost' na avtomobil'nom transporte] / T.F. Shcherbakova, S.S. Sedov, I.A. Kirtaev et al. // *All-Russian scientific and practical conference with international participation "New technologies, materials and equipment of the Russian aerospace industry" [Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem «Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie rossiyskoy aviakosmicheskoy otrasli»]*, 2016, pp. 763–768.

14. Boucsein W. Electrodermal Activity. *Springer Science & Business Media*, vol. 2, 2012. – 618 p.
15. Kukharev G.A., Shchegoleva N.L. Facial recognition systems [Sistemy raspoznavaniya cheloveka po izobrazheniyu litsa]. – SPb. : LETI, 2006, 175 p.
16. Localization of contours of objects on images for variations of a scale using Hough transform is proposed [Lokalizatsiya konturov ob"ektov na izobrazheniyakh pri variatsiyakh masshtaba s ispol'zovaniem preobrazovaniya Khafa] / V.A. Fursov, S.A. Bibikov, P.Yu. Yakimov // *Computer optics [Komp'yuternaya optika]*, 2013, vol. 4, Issue 37, pp. 496–502.
17. Viola P., Jones M. Robust Real-time Object Detection. *International Journal of Computer Vision*, 2004, vol. 57, no. 2, pp. 137–154.
18. Rabiner L.R. A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition // *Proceedings of the IEEE*, 1989, vol. 77, no. 2, pp. 257–286.
19. Neural network-based face detection / H. Rowley, S. Baluja, T. Kanade // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, vol. 20, pp. 22–38.
20. Suykens J., Vandewalle J. Least Squares Support Vector Machine Classifiers // *Neural Processing Letters*, 1999, vol. 9, Issue 3, pp. 293–300.
21. Detecting driving events using smartphone // C. Saiprasert, T. Pholprasit, W. Pattara-Atikom // *Proceedings of the 20th ITS World Congress*, 2013, p. 11.
22. Zadeh L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, vol. 8, Issue 3, pp. 338–353.
23. Kalsoom R., Halim Z. Clustering the driving features based on data streams. *Proceedings of the 2013 16th International Multi Topic Conference*, Lahore, Pakistan, 2013, pp. 89–94.
24. Building a data model for a network attack modeling system based on the ontological approach [Postroenie modeli dannykh dlya sistemy modelirovaniya setevykh atak na osnove ontologicheskogo podkhoda] / I.V. Kotenko, O.V. Polubelova, A.A. Chechulin // *SPIIRAS proceedings [Trudy SPIIRAN]*, Issue 3, SPb. : Nauka, 2013, pp. 26–39.
25. Telematics System in Usage Based Motor Insurance / S. Husnjaka, D. Peraković, Forenbacher I., Mumdzievb M. // *Procedia Engineering*, 2015, vol. 100, pp. 816–825.
26. Wierwille W. Overview of research on driver drowsiness definition and driver drowsiness detection // *Proceedings of the fourteenth international technical conference on enhanced safety of vehicles*. – Munich, 1995, pp. 462–470.

Последовательный алгоритм генерации матрицы коэффициентов для системы однородных дифференциальных уравнений в модели нестационарной системы обслуживания

К.С. Шардаков

Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I
Санкт-Петербург, Россия
k.shardakov@gmail.com

Аннотация. Предлагается последовательный алгоритм генерации матрицы коэффициентов для системы однородных дифференциальных уравнений, описывающих модель нестационарной системы обслуживания. Приведено его сравнение с рекурсивным алгоритмом, а также оптимальная структура хранения списка состояний для последовательного алгоритма. Отмечено увеличение быстродействия алгоритма по сравнению с рекурсивным алгоритмом в связи с отсутствием необходимости сортировки списка состояний и матрицы коэффициентов.

Ключевые слова: алгоритм генерации матрицы коэффициентов, последовательный, рекурсивный, Рунге–Кутты, ode, нестационарная система обслуживания, система мониторинга.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизированные системы мониторинга играют важную роль в жизни современного общества. Мониторинг – это непрерывный процесс наблюдения и регистрации параметров объекта по сравнению с заданными критериями. В ряде отраслей данные собираются и накапливаются очень интенсивно. Математической базой для моделирования систем мониторинга является теория массового обслуживания. Большинство авторов используют модели этой теории в предположении, что очередь заявок бесконечна, существует стационарный режим, а коэффициент загрузки не превышает единицы [1–3]. Большой практический и теоретический интерес представляют нестационарные системы обслуживания (НСО). Существует мало работ, посвященных этой теме в сравнении с работами, посвященными стационарному режиму. Примерами таких работ являются [4–6]. Детально различные модели рассмотрены в [6]. Недостатком работ [4, 5] является то, что в них рассматривается только классический численный метод решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) – метод Рунге–Кутты.

В работах [7–9] представлен численно-аналитический метод, скорость и точность которого при решении системы ОДУ, описывающей НСО, превосходят наиболее рас-

пространенный при решении данного рода задач метод Рунге–Кутты. Одним из преимуществ этого метода является рекурсивный алгоритм генерации матрицы коэффициентов системы ОДУ без выведения общего уравнения системы ОДУ. Но этот алгоритм также имеет существенные недостатки, а именно: 1) на выходе алгоритм предоставляет неупорядоченный список состояний, состояния в нем находятся в порядке их рекурсивного генерирования; 2) на выходе алгоритм предоставляет массив нужной размерности вместо нижней треугольной матрицы; 3) из первых двух пунктов вытекает необходимость сортировки списка состояний и матрицы коэффициентов для приведения их в готовый для дальнейшего использования вид. Если значения в списке состояний поменять местами, необходимо поменять местами строки и столбцы для тех же номеров состояний в матрице, а при больших размерах матрицы это является достаточно ресурсоемкой операцией. Для устранения указанных недостатков предлагается последовательный алгоритм генерации матрицы коэффициентов, использующий совершенно иной подход.

СУТЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АЛГОРИТМА

Суть последовательного алгоритма заключается в разделении списка состояний на подгруппы с одинаковыми свойствами и дальнейшем использовании этих свойств. Для примера рассмотрим простейшую одноканальную СМО, характеризующуюся числом запросов i ($i = 0, N$) в ней и числом запросов j ($j = 0, N - i$), которые уже обработаны, где N – общее число заявок, которые могут поступить в систему. На вход последовательно поступает N заявок с интенсивностями $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$, которые зависят от номера заявки, и обслуживаются с интенсивностями $\{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N\}$, которые также зависят от номера заявки.

Разделим состояния на группы, такие, что в каждой группе при постоянном j значение i будет расти до $N-j$. Отметим несколько важных фактов: 1) количество групп всегда будет равно $N+1$; 2) длина каждой последующей группы всегда будет на 1 меньше текущей; 3) в рамках

одной группы состояния могут переходить друг в друга последовательно и только с интенсивностью λ ; 4) переход с интенсивностью μ может происходить только из состояния i группы j в состояние следующей группы $j+1$, при этом номер нового состояния внутри группы всегда будет $i-1$; интенсивность такого перехода всегда будет μ_j .

Следующим шагом генерируется список состояний длиной $N_s = (N+1) \cdot (N+2) / 2$. Список генерируется простым перебором j во внешнем цикле, i – во внутреннем до тех пор, пока $i+j \leq N$. При достижении этого порога происходит увеличение j на единицу. На выходе алгоритм предоставляет упорядоченный список состояний и делает это в один проход цикла.

Важным компонентом является структура данных для хранения этого списка. Состояния хранятся в списке списков. Основной список содержит в себе несколько групп, каждая из которых является отдельным списком. Внутри группы представлены состояния, каждое из которых хранится как список, содержащий номер состояния и список с его описанием. Такая структура хранения упрощает дальнейшее заполнение матрицы коэффициентов и позволяет не перебирать список состояний при поиске нужного состояния, а сразу обращаться в нужное место в списке. Например:

```

Все состояния [
    Группа [
        Состояние [
            Номер состояния,
            [заявок в системе,
            обработанных заявок]
        ]
    ]
].
    
```

Следующим шагом заполняется матрица коэффициентов. При начальных условиях это квадратная нулевая матрица размерности N_s . Последовательно перебирается список состояний, и для каждого состояния последовательно применяются три краевых условия, благодаря которым

происходят все необходимые изменения матрицы коэффициентов, описывающих это состояние. Обозначим матрицу коэффициентов как A , номер текущего состояния как Num , μ и λ – интенсивности поступления и обслуживания заявки с номером Num .

1. Если это **не** первое состояние внутри своей группы:

$$A_{Num,Num} = A_{Num,Num} - \mu;$$

$$A_{Num,Num-1} = A_{Num,Num-1} + \lambda.$$

2. Если это **не** последнее состояние внутри своей группы:

$$A_{Num,Num} = A_{Num,Num} - \lambda.$$

3. Если это **не** первая группа:

$$A_{Num,Prev_Num} = A_{Num,Prev_Num} + \mu.$$

Здесь $Prev_Num$ – номер состояния, из которого можно попасть в состояние с номером Num , обработав заявку; в списке состояний всегда находится в группе $j-1$ и имеет номер в своей группе $i+1$.

После обработки всех состояний такой алгоритм на выходе предоставляет готовую нижнюю треугольную матрицу коэффициентов, что избавляет от необходимости ее сортировки.

Блок-схема всего алгоритма представлена на рисунке 1.

В следующем разделе представлен сравнительный анализ рекурсивного и последовательного алгоритмов.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕКУРСИВНОГО И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АЛГОРИТМОВ

Оба алгоритма генерации матрицы коэффициентов системы ОДУ без вывода общего уравнения системы были реализованы на языке Python3. Все измерения проводились при запуске алгоритмов на одном и том же устройстве, что позволяет считать полученные значения допустимыми к сравнению. Значения времени работы алгоритмов могут отличаться в большую или меньшую сторону в зависимости от мощности платформы, на которой алгоритмы запускаются, но общие тенденции будут оставаться корректными. Результаты сравнительного анализа представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение времени выполнения алгоритмов

| Количество | | Время | | |
|------------|-----------|---|--------------------------------------|--|
| заявок | состояний | выполнения последовательного алгоритма, с | выполнения рекурсивного алгоритма, с | генерирования без сортировки для рекурсивного алгоритма, с |
| 3 | 10 | 0.0027289390564 | 0.000235080718994 | 0.000102996826172 |
| 5 | 21 | 0.000874042510986 | 0.000907897949219 | 0.000251054763794 |
| 10 | 66 | 0.000315189361572 | 0.00605607032776 | 0.000638008117676 |
| 20 | 231 | 0.00100684165955 | 0.129016876221 | 0.00578188896179 |
| 30 | 496 | 0.00470900535583 | 0.592235088348 | 0.0215079784393 |
| 40 | 861 | 0.00546598434448 | 2.48418688774 | 0.0802609920502 |
| 50 | 1326 | 0.0105609893799 | 12.4112920761 | 0.151191949844 |
| 60 | 1891 | 0.0128128528595 | 83.0276899338 | 0.318285942078 |
| 70 | 2556 | 0.0225200653076 | 224.342078924 | 0.576465129852 |
| 80 | 3321 | 0.0305080413818 | 568.904677153 | 0.847626924515 |
| 90 | 4186 | 0.0393660068512 | 1163.46502709 | 1.33484387398 |
| 100 | 5151 | 0.105370044708 | 2274.09017706 | 1.87042212486 |

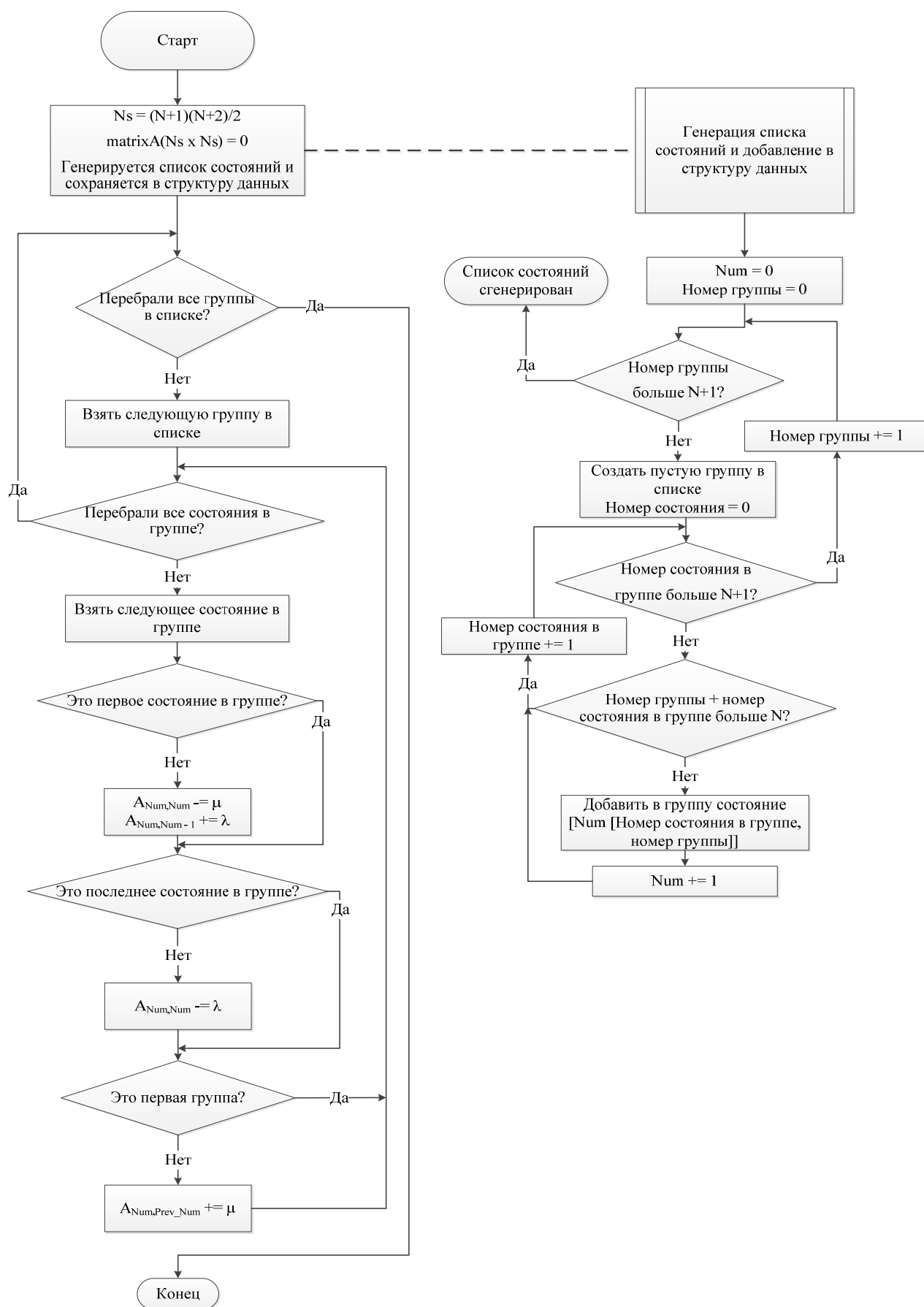


Рис. 1. Блок-схема последовательного алгоритма

Как видно из таблицы 1, количество возможных состояний системы, следовательно, и количество уравнений в системе ОДУ растет экспоненциально от количества заявок, которые могут поступить в НСО. График зависимости количества состояний от количества заявок представлен на рисунке 2.

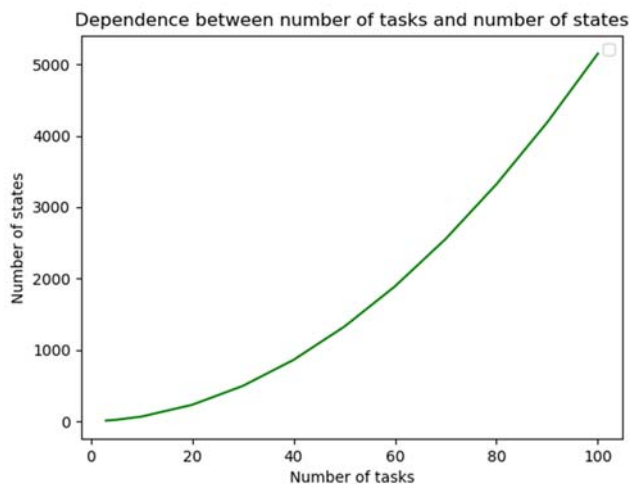


Рис. 2. Зависимость числа состояний от числа заявок

На рисунке 3 представлено сравнение двух частей работы рекурсивного алгоритма: генерации списка состояний и матрицы коэффициентов и их последующая сортировка. Как видно из рисунка 3, при увеличении количества состояний большую часть времени рекурсивный алгоритм занят сортировкой полученных результатов.

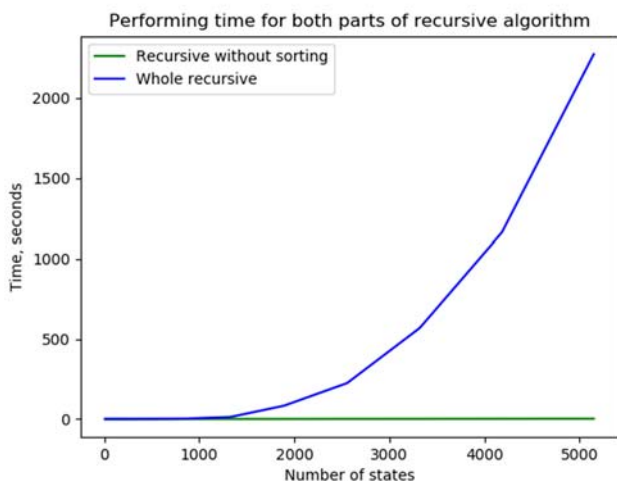


Рис. 3. Время выполнения обеих частей рекурсивного алгоритма

На рисунке 4 представлено сравнение полного времени работы рекурсивного и последовательного алгоритмов генерации матрицы коэффициентов. Время выполнения рекурсивного алгоритма растет экспоненциально при увеличении количества состояний, исходя из рисунка 3 можно заключить, что большая часть этого времени тратится на сортировку.

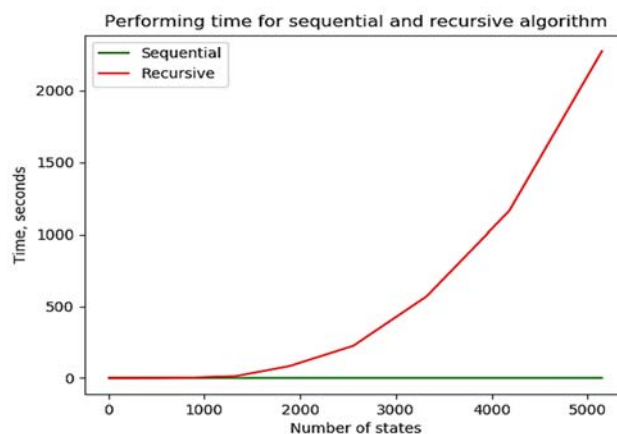


Рис. 4. Время выполнения последовательного и рекурсивного алгоритмов

На рисунке 5 представлено время выполнения последовательного алгоритма и время выполнения рекурсивного алгоритма, исключая трудоемкий этап сортировки. Как можно заметить, даже в этом случае рекурсивный алгоритм уступает последовательному алгоритму в скорости работы.

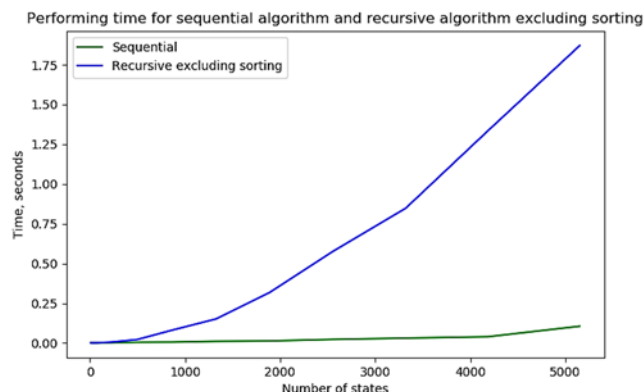


Рис. 5. Время выполнения последовательного алгоритма и рекурсивного алгоритма без сортировки

На рисунке 6 представлен график зависимости времени работы последовательного алгоритма от количества возможных состояний системы. Сняты 100 значений при количестве поступающих заявок от 1 до 100.

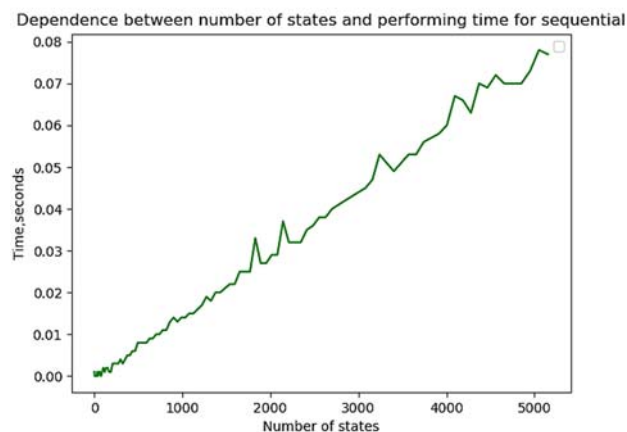


Рис. 6. Зависимость времени работы последовательного алгоритма от числа состояний системы

Как показано на рисунке 6, время выполнения этого алгоритма имеет обыкновенную линейную зависимость от числа поступающих в систему заявок и числа состояний этой системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный последовательный алгоритм имеет неоспоримые преимущества по сравнению с рекурсивным алгоритмом: время его выполнения существенно меньше и линейно зависит от числа поступающих в систему заявок в отличие экспоненциальной зависимости в рекурсивном алгоритме. Последовательный алгоритм на выходе предоставляет отсортированный список состояний и нижнетреугольную матрицу коэффициентов, что избавляет от необходимости сортировки, применяемой в рекурсивном алгоритме.

При увеличении параметров системы может увеличиться количество состояний, в некоторых отдельных случаях – количество правил и условий для переходов, но общая сложность остается на том же уровне. При реализациях численно-аналитического метода последовательный алгоритм рекомендуется использовать вместо рекурсивного алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zegzhda P. D. Using graph theory for cloud system security modeling / P. D. Zegzhda, D. P. Zegzhda, A. V. Nikol'skiy // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2012. Vol. 7531. – Pp. 309–318.
2. Osogami T. Analysis of transient queues with semidefinite optimization / T. Osogami, R. Raymond // *Queueing Systems*. 2013. Vol. 73. – Pp. 195–234.
3. Upadhyaya S. Queueing systems with vacation: an overview / S. Upadhyaya // *International journal of mathematics in operational research*. – 2016. Vol. 9. Issue 2. – Pp. 167–213.
4. Bubnov V.P., Khomonenko A.D., Tyrva A.V. Software reliability model with coxian distribution of length of intervals between errors detection and fixing moments // *Proceedings – International Computer Software and Applications Conference*. 2011. Pp. 310–314.
5. Bubnov V.P., Tyrva A.V., Khomonenko A.D. Model of reliability of the software with coxian distribution of length of intervals between the moments of detection of errors // *Proceedings – International Computer Software and Applications Conference*. 34th Annual IEEE International Computer Soft-

ware and Applications Conference, COMPSAC 2010. – Seoul, 2010. – Pp. 238–243.

6. Разработка динамических моделей нестационарных систем обслуживания / Бубнов В.П., Сафонов В.И. – СПб. : Лань, 1999. – 63 с.

7. Особенности программной реализации численно-аналитического метода расчёта моделей нестационарных систем обслуживания / В.П. Бубнов, А.С. Еремин, С.А. Сергеев // *Труды СПИИРАН*. – 2015. – Вып. 38. – С. 218–232.

8. Рекурсивный метод генерации матрицы коэффициентов системы однородных дифференциальных уравнений, описывающих нестационарную систему обслуживания / В.П. Бубнов, А.Д. Хомоненко, С.А. Сергеев // XVIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2015), 19–21 мая 2015 г., Санкт-Петербург. – СПб. : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – Т. 1. – С. 164–166.

9. Сергеев С.А. Метод составления систем однородных дифференциальных уравнений для расчёта вероятностно-временных характеристик нестационарных систем обслуживания / С.А. Сергеев // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. – 2015. – № 2. – С. 32–42.

10. Wolff R. W., Yao Y.-C. Little's law when the average waiting time is infinite // *Queueing Systems*, 2014, vol. 76. – Pp. 267–281.

11. Sudhesh R., Vijayashree K. V. Stationary and transient analysis of M/M/1 G-queues // *Int. J. of Mathematics in Operational Research*, 2013. vol. 5. no. 2. Pp. 282–299.

12. Sudhesh R., Francis Raj L. Stationary and transient solution of Markovian queues – an alternate approach // *Int. J. of Mathematics in Operational Research*, 2013, vol. 5, no. 3. – Pp. 407–421.

13. Комплекс моделей нестационарных систем обслуживания с распределениями фазового типа / В.П. Бубнов, А.В. Тырва, А.С. Еремин // *Труды СПИИРАН*. – 2014. – № 6(37). – С. 61–71.

14. Fehlberg E. Low-order classical Runge–Kutta formulas with step size control and their application to some heat transfer problems // *NASA Technical Report 315 (1969)*, extract published in *Computing*, 1970. – Vol. 6, no. 1–2. – Pp. 61–71.

15. Бубнов В.П. Алгоритм аналитического расчёта вероятностей состояний нестационарных систем обслуживания / В.П. Бубнов // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. – 2011. – № 4. – С. 90–97.

Sequential Algorithm for Generating of the Coefficient Matrix of the System of Homogeneous Differential Equations in the non Stationary System Maintenance Model

Shardakov K.S.

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

St. Petersburg, Russia

k.shardakov@gmail.com

Abstract: The sequential algorithm for generating a matrix of coefficients for a system of homogeneous differential equations describing a model of a non stationary service system is proposed. Its comparison with the recursive algorithm is given. The optimal storage structure of the list of states for a sequential algorithm is given. An decrease of the performing time for the algorithm compared with the recursive one was noted due to sorting the list of states and matrix of coefficients is not needs.

Keywords: coefficient matrix generation algorithm, sequential, recursive, Runge-Kutta, ode, non-stationary service system, monitoring system.

REFERENCES

1. Zegzhda P. D., Zegzhda D. P., Nikolskiy A. V. (2012). Using graph theory for cloud system security modeling. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – Pp. 309–318.
2. Osogami T., Raymond R. (2013). Analysis of transient queues with semi definite optimization. Queueing Systems, vol. 73. – Pp. 195–234.
3. Upadhyaya S. (2016). Queueing systems with vacation: an overview. International journal of mathematics in operational research, vol. 9, issue 2. – Pp. 167–213.
4. Bubnov V.P., Khomonenko A.D., Tyrva A.V. Software reliability model with coxian distribution of length of intervals between errors detection and fixing moments // International Computer Software and Applications Conference, 2011. – Pp. 310–314.
5. Bubnov V.P., Tyrva A.V., Khomonenko A.D. Model of reliability of the software with coxian distribution of length of intervals between the moments of detection of errors // International Computer Software and Applications Conference. 34th Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference, COMPSAC 2010. – Seoul, 2010. – Pp. 238–243.
6. Bubnov V.P., Safonov V.I. Razrabotka dinamicheskikh modelej nestacionarnyh sistem obsluzhivaniya. [Developing dynamic modeling of non-stationary systems.] / V.P. Bubnov, V.I. Safonov. – Saint-Petersburg, 1999. – 65 p.
7. Bubnov V.P., Eremin A.S., Sergeev S.A. Osobennosti programmnoj realizacii chislenno-analiticheskogo metoda raschyota modelej nestacionarnyh sistem obsluzhivaniya: Trudy SPIIRAN. [Features of the software implementation of umerical-analytical method of calculation models non-stationary service systems: SPIIRAS Proceedings] / V.P. Bubnov, A.S. Eremin, S.A. Sergeev. – 2015. – № 1. – Pp. 218–232.
8. Bubnov V.P., Khomonenko A.D., Sergeev S.A. Recursive method for generating the coefficient matrix of the system of homogeneous differential equations describing nonstationary system maintenance: Proceedings of International Conference on Soft Computing and Measurements, (SCM-2015). – 2015. – C. 75–77.
9. Sergeev S.A. Method for compilation of the system of homogeneous differential equations for calculation probability-time characteristics which describing non stationary systems // Intellectual Technologies on Transport. – 2015. – № 2. – C. 32–42.
10. Wolff R.W., Yao Y.-C. Little's law when the average waiting time is infinite. Queueing Systems, 2014. – Vol. 76. – Pp. 267–281.
11. Sudhesh R., Vijayashree K. V. Stationary and transient analysis of M/M/1 G-queues. Int. J. of Mathematics in Operational Research, 2013, vol. 5, no 2. – Pp. 282–299.
12. Sudhesh R., Francis Raj L. Stationary and transient solution of Markovian queues – an alternate approach. Int. J. of Mathematics in Operational Research, 2013. – Vol. 5. – No. 3. – Pp. 407–421.
13. Bubnov V.P., Tyrva A.V., Eremin A.S. [A set of non-stationary queuing system models with phase-type distributions]. Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings, 2014. – Vol. 6(37). – Pp. 61–71.
14. Fehlberg E. Low-order classical Runge–Kutta formulas with step size control and their application to some heat transfer problems. NASA Technical Report 315 (1969), extract published in Computing, vol. 6, no. 1–2, 1970. – Pp. 61–71.
15. Bubnov V.P. Algoritm analiticheskogo raschyota veroyatnostej sostoyanij nestacionarnyh sistem obsluzhivaniya: Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Algorithm of analytical calculation of non-stationary state probabilities service systems: News from the St. Petersburg University of communication] / V.P. Bubnov. – 2011. – № 4. – Pp. 90–97.

К оцениванию состояний информационных систем с помощью функции энтропии

В.А. Смагин

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского
Санкт-Петербург, Россия
va_smagin@mail.ru

А.Д. Хомоненко

Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I
Санкт-Петербург, Россия
khomon@mail.ru

Аннотация. Рассматривается понятие состояния Л. Заде в теории систем. Это понятие развивается применительно к информационным системам. Предложено состояние определять и количественно оценивать, как и выход информационной системы, функцией распределения энтропии. Предложен переход от теории Л. Заде к использованию уравнения Колмогорова–Чепмена. В качестве исходных данных рекомендовано построение функций распределения энтропии.

Ключевые слова: понятие состояния, информационная система, теория Л. Заде, уравнение Колмогорова–Чепмена, энтропия, функция распределения.

ВВЕДЕНИЕ

В науке и технике часто используется понятие состояния. Наиболее просто оно определяется в теории эксплуатации систем. Это совокупность значений параметров элементов систем. Однако в теории систем понятие состояния рассматривается более точно и строго в зависимости от вида системы. Исследователи особенно связывают это понятие с динамическими системами, более точно – с непрерывными и дискретными системами.

В настоящее время особый интерес проявляется к изучению информационных систем. К примеру, в [1] рассматривается значение энтропии при исследовании состояния информационных систем, анализируется сущность информационной энтропии. Однако понятие состояния в информационных системах исчерпывающе формально не определено. В настоящей статье решаются две задачи: во-первых, связать понятие состояния с классическими результатами теории систем, во-вторых, связать это понятие с достижениями современной теории информации. Словесная формулировка понятия состояния информационной системы вытекает из результатов статьи.

ФОРМАЛЬНЫЙ АНАЛОГ СОСТОЯНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Динамическая система, согласно [2], – это группа преобразований $\{R_i\}$, определённых на сепарабельном метрическом пространстве R и обладающих следующими свойствами:

1. R_i определены для всех t на $-\infty < t < \infty$.

2. Функция $q = f(p, t)$, где q – образ точки p из R в соответствии с R_i , обладает групповым свойством

$$f(p, t_0 + t) = f(f(p, t_0), t). \quad (1)$$

3. Группа R_i непрерывна в том смысле, что для всех t_0 и p_0 , а также последовательностей $\{t_n\}$ и $\{p_n\}$, сходящихся к t_0 и p_0 , справедливо соотношение

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(p_n, t_n) = f(p_0, t_0). \quad (2)$$

Элемент p из R является состоянием динамической системы, а $q = f(p, t)$ описывает состояние системы в момент t при условии, что в момент $t=0$ система находилась в состоянии p .

Это сформулировано на основе анализа задач небесной механики или, если смотреть шире, задач динамики твёрдого тела. Поэтому в определении явным образом не выделены входы и выходы системы. Это определение требует незначительного изменения.

ФОРМАЛЬНЫЙ АНАЛОГ СОСТОЯНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ

Информационная система – это группа преобразований $\{H_i\}$, определённых на вероятностном пространстве H и обладающих следующими свойствами:

1. Преобразования H_i определены для всех t на $[0, \infty)$.

2. Функция $g = f(h, t)$, где g – образ точки из H в соответствии с H_i , обладает групповым свойством

$$f(h, t_0 + t) = f(f(h, t_0), t). \quad (3)$$

3. Группа H_i непрерывна в том смысле, что для всех t_0 и h_0 , а также всех последовательностей $\{t_n\}$ и $\{h_n\}$, сходящихся к t_0 и h_0 , справедливо соотношение

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(h_n, t_n) = f(h_0, t_0). \quad (4)$$

Элемент h из H является состоянием информационной системы, а $g = f(h, t)$ описывает состояние информационной системы в момент t при условии, что в момент $t=0$ система находилась в состоянии h . Это определение требует конкретизации и уточнения.

В качестве функции $f(t)$, на наш взгляд, можно принять плотность или функцию распределения энтропии, подаваемую на вход системы. Для примера мы рассмотрели функцию дифференциальной энтропии для нормального распределения с плотностью вероятности $f(t) = dnorm(t, m, \sigma)$, $m = 100$ ед., $\sigma = 20$ ед. Она имеет вид:

$$h_1(t) = - \int_0^t f(z) \ln(f(z)) dz. \quad (5)$$

Выражение (5) – первый начальный момент случайной величины энтропии. Второй начальный момент энтропии

$$h_2(t) = - \int_0^t f(z)(\ln(f(z)))^2 dz. \quad (6)$$

Аналогично можно найти и высшие начальные моменты энтропии. При практических применениях достаточно ограничиться двумя моментами. На рис. 1 показан график функции $h_1(t)$.

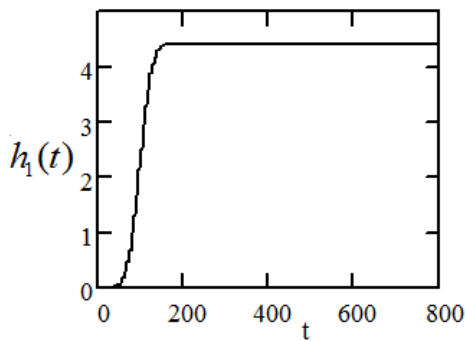


Рис. 1. График функции $h_1(t)$

Для нашего примера минимальное значение энтропии равно 0 нит., максимальное 4,415 нит. Срединное значение $h_1(100) = 2,207$ нит. Для первого случая начальные моменты равны соответственно: $v_1(800) = 4,415$ нит., $v_2(800) = 19,989$ нит.², среднеквадратичное отклонение $\delta(800) = 0,707$ нит., коэффициент вариации $\eta(800) = 0,16$. Для второго случая соответствующие значения: $v_1(100) = 2,207$ нит., $v_2(100) = 9,905$ нит.², $\delta(100) = 2,263$ нит., $\eta(100) = 1,0125$. Для приведенных данных плотности вероятностей случайных величин энтропии определяются соотношениями:

$$g_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0,707} \times e^{-\frac{(x-4.415)^2}{2 \times 0.707^2}};$$

$$g_2(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 2,263} \times e^{-\frac{(x-2.207)^2}{2 \times 2.263^2}}. \quad (7)$$

Графики плотностей $g_1(x)$ и $g_2(x)$ приведены на рис. 2.

ПОНЯТИЕ ОРИЕНТИРОВАННОГО АБСТРАКТНОГО ОБЪЕКТА
Л. ЗАДЕ

Согласно [3], под ориентированным абстрактным объектом (ОАО) понимают определённую систему, связанную с некоторым входным сигналом (причиной) u и выходным сигналом (следствием). Оба сигнала понимаются как векторные функции времени. Взаимосвязь между ними не является однозначной. Конкретной функции u может соответствовать несколько выходных функций y , и, наоборот, конкретный выходной сигнал может соответствовать нескольким входным функциям.

Для формализации ОАО отрезок функции u , определённой на интервале наблюдения $[t_0, t_1]$, обозначается $u[t_0,$

$t_1]$ на закрытом или $u(t_0, t_1]$ на полуоткрытом интервале, в зависимости от контекста – просто u . В результате экспериментального исследования обычно получают множество пар вход–выход $(u(t_0, t_1], y(t_0, t_1])$.

Если такой же сигнал подать на вход другого образца исследуемого устройства, то выходной его сигнал не обязательно должен быть таким же, как в первом случае, так как начальные условия для второго образца могут быть отличными. Поэтому определение [2] отражает тот факт, что заданному $u(t_0, t_1]$ может соответствовать более одного $y(t_0, t_1]$.

Множество упорядоченных пар функций времени на указанном интервале обозначается как

$$R(t_0, t_1] = \{u(t_0, t_1], y(t_0, t_1]\}. \quad (8)$$

На основании этого понятия в [3] предлагается следующее определение. ОАО A называется некоторое семейство $R(t_0, t_1] = \{u(t_0, t_1], y(t_0, t_1]\}$, $t_0, t_1 \in (0, \infty)$, множеств упорядоченных пар (u, t) функций времени, где первый элемент в (8) называется отрезком входного сигнала или просто входным сигналом, второй – отрезком выходного сигнала или просто выходным сигналом. Таким образом, ОАО отождествляется с множеством пар вход–выход, принадлежащих A . Кроме того, любой отрезок пары, для которой $t_0 \leq \tau_0 \leq t_1, \tau_0 \leq \tau_1 \leq t_1$, должен принадлежать A .

Множество всех отрезков u на интервале $(t_0, t_1]$, таких что $(u, y) \in A$, называют пространством входных сигналов A и обозначают $R[u]$. Точно так же множество всех отрезков y , таких что $(u, y) \in A$, называют пространством выходных сигналов и обозначают $R[y]$. Отсюда следует, что множество $R(t_0, t_1]$ всех пар $(u(t_0, t_1], y(t_0, t_1]) \in A$, есть некоторое подмножество произведения $R[u] \times R[y]$. В «перечне» упорядоченных пар (u, y) каждому фиксированному u соответствует, вообще говоря, множество различных y и, наоборот, каждому фиксированному y – множество различных пар.

С точки зрения математики это сводится по существу к определению системы как отношения, а не функции или оператора. Различие можно пояснить на примере интегратора. Значения входного и выходного сигналов в один и тот же момент времени t связаны друг с другом с помощью дифференциального уравнения

$$\frac{dy(t)}{dt} = u(t). \quad (9)$$

Утверждение, что интегратор – это ОАО, можно описать совокупностью упорядоченных пар функций времени вида

$$(u(t), \alpha + \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi, t_0 \leq t \leq t_1 \in (0, \infty),$$

где параметр α принадлежит пространству вещественных чисел, а функция u – классу функций времени, интегрируемых на любом конечном интервале. В этом случае каждому фиксированному значению $u(t_0, t_1]$ соответствует некоторое множество $y(t_0, t_1]$, каждый элемент которого отвечает различным значениям параметра α :

$$y(t) = \alpha + \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi, t_0 \leq t \leq t_1. \quad (10)$$

Любое математическое отношение между u и y , определяющее совокупность пар вход–выход, образующих A , называется характеристикой вход–выход для A . В этом смысле (10) является характеристикой вход–выход для A . В более общем плане, если входной и выходной сигналы системы A удовлетворяют дифференциальному уравнению вида

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + \dots + a_0(t)y = b_m(t) \frac{d^m u}{dt^m} + \dots + b_0(t), \quad (11)$$

это уравнение составляет характеристику вход–выход для A , поскольку оно определяет множество всех пар вход–выход, принадлежащих A .

Полезно параметризовать множество пар вход–выход $R(t_0, t_1]$ так, чтобы каждому отрезку входного сигнала $u(t_0, t_1]$ и каждому значению параметра соответствовал единственный отрезок выходного сигнала $y(t_0, t_1]$. Такая параметризация соответствовала бы нумерации страниц «перечня» пар вход–выход, на каждой странице которого выписаны пары с одинаковыми выходными сигналами. Состояния A – по существу значения такого параметра. С этой точки зрения основной ролью понятия состояния является обеспечение возможности связать с каждым входным сигналом единственный выходной сигнал, используя состояние системы в качестве параметра.

ПОНЯТИЕ СОСТОЯНИЯ

Изложим подход к построению понятия состояния Л. Заде [3]. Утверждение: на основании содержания раздела 3 можно принять, что параметр α параметризует A , если найдётся некоторая функция \underline{A} , определённая на произведении $\Sigma \times R[u]$ и такая, что для всех пар (u, y) , принадлежащих A , и всех t_0 и t_1 можно выбрать из Σ такое α , что

$$y = \underline{A}(\alpha; u). \quad (12)$$

Для каждого α из Σ и для каждого u из $R[u]$ в этом случае пара $(u, \underline{A}(\alpha; u))$ является парой вход–выход, принадлежащей A . Чтобы назвать α состоянием системы, нужно, чтобы функция \underline{A} обладала свойством сопряжения реакций, которое формулируется так. Условимся, что uv обозначает сигнал, в котором отрезок $v = v(t, t_1]$ следует за отрезком $u = u(t, t_1]$. Это одна из причин для предпочтения пользоваться полуоткрытыми интервалами наблюдения. Иначе возникла бы трудность с определением uv в точке t при условии, что $u(t) \neq v(t)$. В частности, если по определению $u = u(t_0, t_1]$ и $u = u(t, t_1]$, то $uu = u(t_0, t_1]$.

Определение 1. Функция $\underline{A}(\alpha; u)$ обладает свойством сопряжения реакций, если для каждого α из Σ и каждого uu из $R[uu]$ найдётся такой элемент α^* из Σ , однозначно определяемый α и u , что

$$\underline{A}(\alpha; uu) = \underline{A}(\alpha; u)\underline{A}(\alpha^*; u). \quad (13)$$

Условие (13) означает, что выходной сигнал (реакция системы, соответствующая значению параметра α и отрезку uu выходного сигнала), совпадает с отрезком реакции, соответствующим параметру α и входному сигналу u , за которым следует отрезок реакции, соответствующий параметру α^* и входному сигналу u . Важность свойства сопряжения реакций станет более ясной, как только будет определено то, что называется состоянием системы.

Определение 2. Если с помощью α осуществляется параметризация A и функция $\underline{A}(\alpha; u)$ обладает свойством сопряжения реакций, то элементы Σ представляют состояния системы A , пространство Σ называется пространством состояний A , а характеристикой вход–выход – состояние для A . Если $u = u(t_0, t_1]$, то α из $\underline{A}(\alpha; u)$ называется начальным состоянием системы A в момент времени t_0 и обозначается через $s(t_0)$. В связи с этим характеристика вход–выход – состояние системы A – может быть представлена в более явном виде как

$$y(t_0, t] = \underline{A}(s(t_0); u(t_0, t]), \quad (14)$$

где $u(t_0, t_1]$ – отрезок входного сигнала; $s(t_0)$ – начальное состояние системы; $y(t_0, t]$ – выходной сигнал.

Таким образом, уравнение (14) утверждает, что $s(t_0)$ – начальное состояние системы A в момент времени t_0 и отрезок входного сигнала $u(t_0, t_1]$ однозначно определяет отрезок реакций $y(t_0, t]$.

Определение 3. Пусть система A находится в состоянии $s(t_0) = \alpha$ и на её вход подан сигнал $u = u(t_0, t_1]$. Благодаря сопряжению реакций $\underline{A}(\alpha; u)$ существует элемент $\alpha^* \in \Sigma$ такой, что уравнение (13) справедливо для любого $u = u(t, t_1]$.

Элемент α^* , однозначно определяющийся значениями $s(t_0)$ и $u = u(t_0, t_1]$, называется состоянием системы A в момент времени t и обозначается $s(t)$. Таким образом, состояние системы в момент времени t однозначно определяется состоянием системы в момент времени t_0 и значением сигнала на её входе в промежутке между этими моментами времени. Символически

$$s(t) = s(s(t_0), u(t_0, t_1]), \quad (15)$$

и полученное уравнение называется уравнением состояния A . Поэтому свойство сопряжения реакций (13) может быть выражено так:

$$\underline{A}(s(t_0); uu) = \underline{A}(s(t_0); u)\underline{A}(s(t); u). \quad (16)$$

Реакция системы A , находящейся в состоянии $s(t_0)$, на входной сигнал uu должна быть идентична реакции системы A , находящейся в состоянии $s(t_0)$, на входной сигнал u и последующей реакции этой же системы, находящейся в состоянии $s(t)$, на входной сигнал u .

В [3] показано: из того, что функция $\underline{A}(\alpha; u)$ обладает свойством сопряжения реакций, определённым уравнениями (13) и (16), следует, что функция s из уравнения (15) обладает свойством сопряжения состояний:

$$s(s(t_0); uu) = s(s(t_0); u; u). \quad (17)$$

Это свойство эквивалентно групповому свойству 2 при определении динамической системы. Рассмотрим простой пример с характеристикой вход–выход:

$$\frac{dy}{dt} + y = u. \quad (18)$$

В этом случае пары вход–выход, определённые на $(t_0, t_1]$, имеют вид:

$$(u(t)), \alpha e^{-(t-t_0)} + \int_{t_0}^t e^{-(t-\xi)} u(\xi) d\xi, t_0 < t \leq t_1. \quad (19)$$

Если отождествить Σ с осью вещественных чисел $(0, \infty)$, то параметр α из уравнения (19) можно использовать для параметризации A . Более того, написав уравнение

$$y(t) = \alpha e^{-(t-t_0)} + \int_{t_0}^t e^{-(t-\xi)} u(\xi) d\xi, \quad t_0 < t \leq t_1, \quad (20)$$

легко проверить справедливость тождества:

$$\begin{aligned} \alpha e^{-(t-t_0)} + \int_{t_0}^t e^{-(t-\xi)} u(\xi) d\xi = \\ \alpha e^{-(t-\tau)} + \int_{t_0}^t e^{-(\tau-\xi)} u(\xi) d\xi, \end{aligned} \quad (21)$$

где $t_0 \leq \tau_0 \leq t$ и

$$\alpha^* = \alpha e^{-(\tau-t_0)} + \int_{t_0}^t e^{-(\tau-\xi)} u(\xi) d\xi. \quad (22)$$

Уравнение (20) эквивалентно соотношению вида (13) $y = \underline{A}(\alpha; u)$, поскольку оно определяет значения y для $t > t_0$. Более того, уравнения (20) и (22) свидетельствуют о том, что функция в правой части уравнения (20) обладает свойством сопряжения реакций. Поэтому уравнение (20) можно назвать характеристикой вход–выход–состояние для системы A , где α – состояние системы в момент времени t_0 и $\Sigma = (0, \infty)$, отметим также, что положив $t = t_0$ (что допустимо, если u не содержит дельта-функций с особенностью в точке t_0), получим

$$s(t_0) = \alpha = y(t_0). \quad (23)$$

Отсюда следует, что состояние системы A в момент времени t_0 можно отождествить с выходным сигналом этой системы в момент времени t_0 . На этом заканчивается определение состояния и пример, иллюстрирующий определение.

В качестве итогов изучения понятия состояния Л. Заде отметим следующее.

1. Исходом служит введение понятия абстрактного объекта A , определяемого как семейство упорядоченных пар функций времени. Абстрактный объект определяется сам по себе независимо от того, как вводится для него понятие состояния.

2. Понятие состояния вводится как способ параметризации множества пар вход–выход, обеспечивающих однозначную зависимость выходного сигнала от входного сигнала и состояния системы. Но существует бесчисленное количество способов параметризации пар вход–выход. Отсюда следует заключить, что любой характеристике вход–выход может соответствовать много характеристик вход–выход–состояние, которые по существу эквивалентны. Характеристику вход–выход–состояние можно рассматривать как описание ориентированного абстрактного объекта при конкретном выборе системы параметров для совокупности его пар вход–выход.

3. Определение 3 распространяется на более широкий класс систем, чем динамические системы. В связи с этим определения 1 и 2 являются более общими определениями понятия состояния, чем косвенное определение этого понятия, содержащегося в неявном виде в определении динамической системы.

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ ПОНЯТИЯ СОСТОЯНИЯ
К ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Используем в качестве входа $u(t)$ функции плотности распределений случайной величины энтропии $g_1(t), g_2(t)$, представленные на рис. 2.

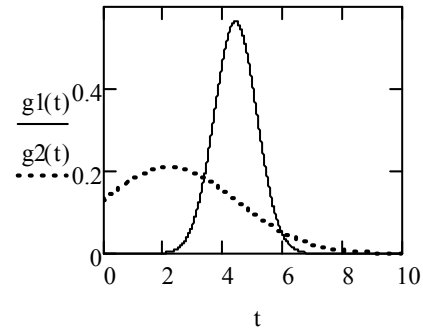


Рис. 2. Функции плотности

Применим эти функции для построения состояний и функций выхода информационных систем, применяя результаты теории Л. Заде. Для иллюстрации расчётов используем элемент интегратор. Зависимость для него вход–выход представляется дифференциальным уравнением:

$$\frac{dy}{dt} + y = u. \quad (24)$$

В этом уравнении $u_1(t) = g_1(t), u_2(t) = g_2(t)$. Так как он представляется ОАО, то первую зависимость можно описать совокупностью упорядоченных пар функций времени следующего вида (на примере $g_1(t)$):

$$(g_1(t)), \alpha + \int_{t_0}^{t_1} g_1(\xi) d\xi, \quad t_0 \leq t \leq t_1 \in (0, \infty). \quad (25)$$

В этом случае каждому фиксированному значению $g_1(t_0, t_1)$ соответствует некоторое множество $y(t_0, t_1]$, каждый элемент которого отвечает различным значениям параметра α :

$$y(t) = \alpha + \int_{t_0}^{t_1} g_1(\xi) d\xi, \quad t_0 \leq t \leq t_1, \quad t \in (0, \infty). \quad (26)$$

Это отношение между $g_1(t)$ и y , определяющее совокупность пар вход–выход, образующих систему A , является характеристикой вход–выход для A , и α есть состояние системы. Но для этого нужно потребовать, чтобы функция системы A на основе параметризации обладала свойством сопряжения реакций и определялась новая функция $y = \underline{A}(\alpha; u)$, удовлетворяющая свойству

$$\underline{A}(\alpha; uv) = \underline{A}(\alpha; u) \underline{A}(\alpha^*; u), \quad (27)$$

где $\alpha^* = \alpha e^{-(\tau-t_0)} + \int_{t_0}^t e^{-(\tau-\xi)} g_1(\xi) d\xi$, а uv – сигнал, в котором отрезок $v = g_1(t, t_1]$ следует за отрезком $u = g_1(t_0, t]$. В этом случае можно утверждать:

$$s(t_0) = \alpha = y(t_0), \quad (28)$$

что означает состояние системы A в момент времени t_0 . Его можно отождествить с выходным сигналом этой системы в момент времени t_0 . Далее следует

$$s(t) = s(s(t_0); g_1(t_0, t]); \quad (29)$$

$$s(s(t_0); u) = s(s(t_0); g_1(t_0, t]); g_1(t, t_1]). \quad (30)$$

Значение выходной переменной определяется как

$$y_{(t_0, t]} = \underline{A}(s(t_0); g_1(t_0, t]). \quad (31)$$

Рассмотрим численное изложение примера при исходных данных для точки максимума энтропии на рис. 1. Среднее значение энтропии и среднеквадратичное отклонение будут равны $v_1 = 4,415$ нит., $\sigma = 0,707$ нит. Функция входа в интегратор $u_1(t) = \text{dnorm}(t, v_1, \sigma)$. Примем начальные значения времени $t_0 = 1,3\text{h}$. Для них значения состояния будут $s(1) = 6,815$ нит. и $s(3) = 0,023$ нит., выходные переменные

$$y_{11}(t) = s(1) + \int_1^t u_1(\xi) d\xi;$$

$$y_{12}(t) = s(3) + \int_3^t u_1(\xi) d\xi,$$

а их интегральные составляющие

$$v_{11}(t) = \int_1^t u_1(\xi) d\xi; \quad v_{12}(t) = \int_3^t u_1(\xi) d\xi.$$

На рис. 3 и 4 показаны графики этих функций. Из рисунков следует, что различие между графиками практически отсутствует.

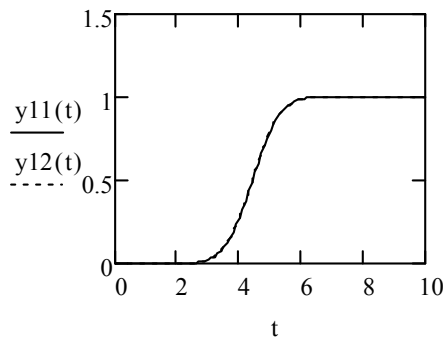


Рис. 3. Графики $y_{11}(t)$ и $y_{12}(t)$

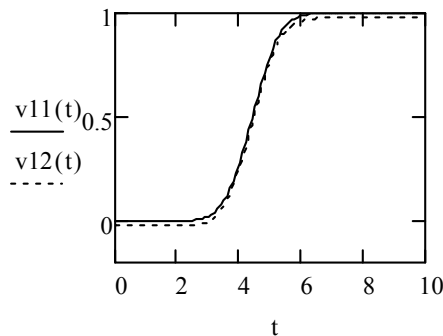


Рис. 4. Графики $v_{11}(t)$ и $v_{12}(t)$

Рассмотрим изложение примера при исходных данных для точки среднего значения энтропии на рис. 1.

Среднее значение энтропии и среднеквадратичное отклонение равны соответственно $v_2 = 2,207$ нит., $\sigma = 2,263$ нит. Функция входа в интегратор $u_2(t) = \text{dnorm}(t, v_2, \sigma)$. Примем начальные значения времени $t_0 = 1,3\text{h}$. Для них значения состояния равны соответственно $s(1) = 0,158$ нит., $s(3) = 0,565$ нит., выходные переменные

$$y_{21}(t) = s(1) + \int_1^t u_2(\xi) d\xi; \quad y_{22}(t) = s(3) + \int_3^t u_2(\xi) d\xi,$$

а их интегральные составляющие $v_{21}(t) = \int_1^t u_2(\xi) d\xi;$

$$v_{22}(t) = \int_3^t u_2(\xi) d\xi.$$

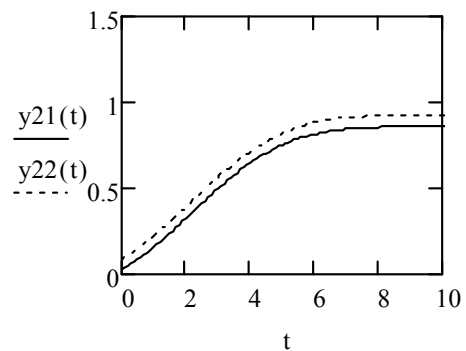


Рис. 5. Графики $y_{21}(t)$ и $y_{22}(t)$

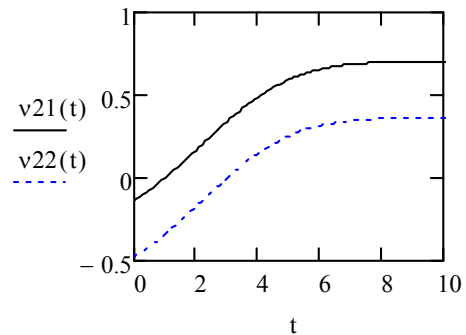


Рис. 6. Графики $v_{11}(t)$ и $v_{12}(t)$

Графики на рис. 3–6 показывают, как в зависимости от t_0 и $u(t)$ изменяются значения переменных на выходе интегратора, измеряемые величиной функции распределения энтропии. Они же могут выступать как значения будущих состояний в случае продолжения во времени рассматриваемого процесса.

Нами рассмотрен пример расчёта при условии, что вторая фаза процесса не зависит от продолжительности первой фазы. Это не в полной мере соответствует уравнению (32), представленному ниже. Если же учесть эту зависимость, то придётся построить двумерные графики расчётов.

Об АНАЛОГИИ ТЕОРИИ Л. ЗАДЕ И УРАВНЕНИЙ КОЛМОГОРОВА–ЧЕПМЕНА ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

На основе изучения модели состояния Л. Заде напрашивается качественный вывод: в информационной системе в качестве состояния на входе можно принять значение функции распределения энтропии в начальный момент времени до начала процесса преобразования информации в системе. А для значений переменной на выходе системы принимать значения функции распределения энтропии, полученные в результате преобразования в системе.

Эвристическое утверждение. Для сложной системы в качестве предмета будущего исследования её информационного свойства попытаться применить уравнение Колмогорова–Чепмена [5]. И это уравнение описать с применением теории Л. Заде, но с использованием функций распределения энтропии для определения состояний и выходных переменных системы [6].

Рассмотрим более простой пример, чем интегратор, а именно двухфазный однолучевой случайный процесс с позиции решения простейшего уравнения Колмогорова–Чепмена. Это позволяет показать процесс решения уравнения Колмогорова–Чепмена и сравнить адекватность исследования с теорией Л. Заде. Представим пример для численной иллюстрации решения уравнения Колмогорова–Чепмена:

$$p_{02}(t_0, t + \Delta t) = p_{01}(t_0, t)p_{12}(t, t + \Delta t), \quad (32)$$

$$t_0 < t < t + \Delta t.$$

Уравнение (32) отражает наличие в нём трёх дискретных состояний и двух фаз с непрерывными распределениями, следующими друг за другом. Причём вторая фаза зависима от первой фазы. Требуется вычислить выходную переменную (состояние 02), если начальное состояние определяется задержкой на первой фазе t_0 , а непрерывные распределения являются независимыми. Исходные данные: $t_0 = 10$ нит., первая фаза $f_{01} = \text{dnorm}(t, v_1, \sigma_1)$, $v_1 = 50$ нит., $\sigma_1 = 12$ нит., вторая фаза $f_{12} = \text{dnorm}(t, v_2, \sigma_2)$, $v_2 = 40$ нит., $\sigma_2 = 7$ нит. Вероятности того, что фазы будут не меньше t , представляются как $p_{01}(t) = \int_t^\infty f_{01}(z) dz$,

$p_{12}(t) = \int_t^\infty f_{12}(z) dz$. переменные t_0, t измеряются мерой нит.

Напомним, что нами исследуется информационная система, определяемая информационными состояниями и выходами, введённые выше плотности и вероятности заранее измеряются энтропийными распределениями. Выполним следующие численные расчеты.

А. Фазы независимы.

$$p_{01}(t) = \int_{t_0+t}^\infty f_{01}(z) dz / \int_{t_0}^\infty f_{01}(z) dz;$$

$$p_{12}(t) = \int_t^\infty f_{12}(z) dz; \quad (33a)$$

$$p_{02}(t) = p_{01}(t)p_{12}(t).$$

Результаты вычислений представлены на рис. 7. Для примера рассмотрим значения кривых в точке $t = 35$ нит.: $p_{01}(t) = 0,662$ нит., $p_{12}(t) = 0,762$ нит., $p_{02}(t) = 0,505$ нит.

Начальное состояние $s(t_0) = \int_0^{t_0} f_{01}(z) dz$ равно: $s(10) = 4,136 \times 10^{-4}$ нит. и $s(30) = 0,048$ нит.

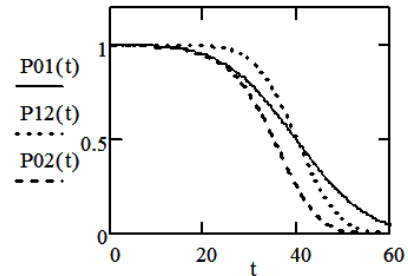


Рис. 7. Графики $p_{01}(t)$, $p_{12}(t)$ и $p_{02}(t)$ для $s(10)$

На рис. 8 при $s(30)$ для сравнения приведен аналог рис. 7 при $s(10)$. Для оценивания функции неопределённости на выходе системы на основе применения уравнения Колмогорова–Чепмена следует вместо показателя $P_{02}(t)$ применять показатель $y(t) = 1 - P_{02}(t)$.

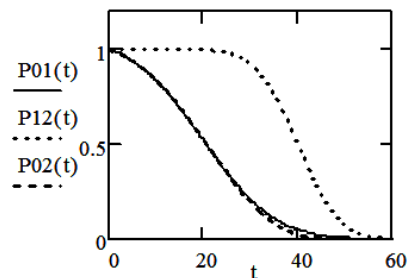


Рис. 8. Графики $p_{01}(t)$, $p_{12}(t)$ и $p_{02}(t)$ для $s(30)$

Приведенный пример иллюстрирует метод определения состояния и величины функции на выходе системы на основе решения уравнения Колмогорова–Чепмена. Реальные информационные системы более сложны, они, как правило «многолучевые», могут содержать в каждом «информационном луче» более двух фаз случайных процессов. Число состояний (начального и промежуточных) может быть очень большим.

Б. Фазы зависимы. В этом случае формулы для вероятностей осуществления фаз принимают вид:

$$p_{01}(t) = \frac{\int_{t_0+t}^\infty f_{01}(z) dz}{\int_{t_0}^\infty f_{01}(z) dz};$$

$$p_{12}(t, t + \Delta t) = \frac{\int_{t+\Delta t}^\infty f_{12}(z) dz}{\int_t^\infty f_{01}(z) dz}; \quad (33b)$$

$$p_{02}(t, t + \Delta t) = p_{01}(t)p_{12}(t, t + \Delta t).$$

Пусть $t = 30h.$, $\Delta t = 15h.$, тогда $p_{01}(30) = 0,798$, $p_{1,2}(30,45) = 0,249$, $p_{0,2}(30,45) = 0,199$. Так как $p_{0,2}(t, \Delta)$ – функция двух переменных, то для неё можно построить двумерную графическую зависимость.

Аналогичным образом можно рассмотреть пример применения уравнения Колмогорова–Чепмена, охватывающего обратной связью. Применение систем уравнений типа Колмогорова–Чепмена для оценивания и прогнозирования значений показателей энтропийной (информационной) неопределённости, на наш взгляд, может быть результативным. Оно требует дальнейшего изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сущность предлагаемой модели состоит в том, что понятие состояния, вход и выход информационных систем следует измерять такими показателями, которыми измеряются энтропия и информация. Поэтому нами предлагается информационная модификация модели Л. Заде. Чтобы работать с такой моделью, необходимо на основе метода моментов случайной величины энтропии приближённо построить необходимые функции распределения всех компонентов, составляющих информационную систему. Затем, используя эти функции распределения, можно применить модель Л. Заде. Приведён пример расчёта для интегратора [3].

Сущность метода состоит в модификации метода решения уравнения Колмогорова–Чепмена применением в нём функций распределения случайной величины энтропии. Рассмотрены простейшие примеры для уравнения с тремя дискретными состояниями и двумя случайными фазами с нормальными распределениями. Общий вывод: показатели состояния и выхода в информационной системе должны измеряться энтропией (информацией), связанной с определённой вероятностью.

Приведем ряд современных работ, касающихся актуальных прикладных направлений исследований в области применения моделей информационных систем, в том числе на основе использования энтропии. В [7] рассмотрены вопросы, связанные с понятием информации и терминологии в этой области, а также модели информационной, коммуникационной и инфокоммуникационной систем и их взаимосвязь. В [8] проводится анализ систем обеспечения информационной безопасности с позиции определения полной энтропии информационной системы. В [9] предлагаются алгоритмы кластеризации, основанные на многоуровневых энтропийных подграфах. В [10] модель облачных вычислений в информационных системах с Web-интерфейсом на основе многоканальной системы массово-

го обслуживания с «охлаждением» и итерационным решением уравнений Колмогорова–Чепмена. В [11] рассматриваются понятия информационной энтропии, грубой энтропии, грануляции знаний и меры гранулярности в неполных информационных системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркелов В.М. О системной информации в аддитивных информационных системах // Перспективы науки и образования. – 2014. – № 5 (11). – С. 31–36.
2. Немыцкий В.В. Топологические вопросы в теории динамических систем // Успехи математических наук. – 1949. – Т. 4. – Вып. 6(34). – С. 91–153.
3. Заде Л. Понятие состояния в теории систем // Общая теория систем : сборник докладов ; пер. с англ. В. Я. Алтаева, Э.Л. Наппельбаума. – М. : Мир, 1966. – С. 49–65.
4. Zaden L., Desoer C.F. *Liner System Theory. – The State Space Approach*, McGraw-Hill, N.Y., 1963.
5. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и её приложения. Т. 1.– М. : Мир, 1984. – 528 с.
6. Smagin V.A., Smagin S.Yu. Approximate Determination of the Distribution of Entropy // *Automatic Control and Computer Sciences*. – 2010. – no. 2 (44). – Pp. 27–37.
7. Кудряшов В.А. Логико-графический анализ иерархии информационных процессов // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2016. – № 2 (6). – С. 30–35.
8. Лившиц И.И., Неклюдов А.В. К вопросу оценивания энтропии систем обеспечения информационной безопасности // Вопросы кибербезопасности. – 2017. – № 5(24). – С. 30–41.
9. Santos J.M., Sa J.M., Alexandre L.A. LEGClust – a clustering algorithm based on layered entropic subgraphs. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2008, vol. 30, no. 1, pp. 1–13.
10. Моделирование облачных вычислений с использованием многоканальной системы массового обслуживания с «охлаждением» / А.Д. Хомоненко, М.М. Халиль, С.И. Гиндин // *Материалы XIX Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2016)*, 25–27 мая 2016, Санкт-Петербург. Т. 1.– СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – С. 247–251.
11. Liang, J., Shi, Z., Li, D., Wierman, M. J. Information entropy, rough entropy and knowledge granulation in incomplete information systems // *International Journal of General Systems*. 2006 / 12. Vol. 35; Iss. 6. – Pp. 641–654.

On the Estimation of the States of Information Systems by Entropy Function

V.A. Smagin

A. F. Mozhaysky Military Aerospace Academy
St. Petersburg, Russia
va_smagin@mail.ru

A.D. Khomonenko

Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University
St. Petersburg, Russia
khomon@mail.ru

Abstract. The concept of a state of L. Zadeh of the theory of systems is in detail studied. The yielded concept educes with reference to information systems. It is offered to define a state and quantitatively to estimate, as well as a yield of information system, the entropy distribution function. Transferring from L. Zadeh theory to use of the equation of Kolmogorov's–Chepmen's is offered. As the initial data construction of distribution functions of entropy is recommended.

Keywords: concept of a state, information system, L. Zaden theory, Kolmogorov's equation – Chepmen's, entropy, the distribution function.

REFERENCES

1. Markelov V.M. About system information in additive information systems [*O sistemnoy informatsii v additivnykh informatsionnykh sistemakh*]. Perspectives of Science and Education [*Perspektivy Nauki i Obrazovaniya*], 2014, № 5(11). – Pp. 31–36.
2. Nemytskiy V.V. Topological questions in the theory of dynamic systems [*Topologicheskie voprosy v teorii dinamicheskikh system*]. Achievements of mathematical sciences [*Uspekhi matematicheskikh nauk*]. – 1949. T. 4. Issue 6(34). – S. 91–153.
3. Zadeh L.A. The concept of state in system theory. Views on general systems theory. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1964. – 188 p. – Pp. 49–60.
4. Zaden L., Desoer C.F. Liner System Theory. The State Space Approach, McGraw-Hill, N.Y., 1963.
5. Feller W. An Introduction to Probability Theory and its Applications. Vol. 1. John Wiley & Sons Inc. – 1957. – 528 p.
6. Smagin V.A., Smagin S.Yu. Approximate Determination of the Distribution of Entropy. Automatic Control and Computer Sciences. – 2010. – no. 2 (44). – Pp. 27–37.
7. Kudriashov V.A. Logical-Graphic Analysis of Hierarchy of Information Processes [*Logiko-graficheskiy analiz ierarkhii informatsionnykh protsessov*]. Intellectual Technologies on Transport. – 2016. – No. 2 (6). – C. 30–35.
8. Livshitz I.I., Neklydov A.V. Assessment of Entropy of Information Security Systems [K voprosu otsenivaniya entropii sistem obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti]. Questions of cyber security [Voprosy kiberbezopasnosti]. – 2017. – no. 5(24). – Pp. 30–41.
9. Santos J.M., Sa J.M., Alexandre L.A. LEGClust – a clustering algorithm based on layered entropic subgraphs // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2008. – vol. 30. – no. 1. – Pp. 1–13.
10. A cloud computing model using multi-channel queuing system with cooling / Anatoly D. Khomonenko, Sergey I. Gindin; Khalil Maad Modher // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016. Pp. 103–106, DOI: 10.1109/SCM.2016.7519697.
11. Liang J., Shi Z., Li D., Wierman M. J. Information entropy, rough entropy and knowledge granulation in incomplete information systems // International Journal of General Systems. – 2006 / 12 Vol. 35; Iss. 6. – Pp. 641–654.

Исследование влияния факторов космического пространства на бортовую радиоэлектронную аппаратуру по результатам эксперимента на космическом аппарате «Можаяец»

Я.Р. Горшков, Г.В. Кремез, Н.В. Михеев
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
Санкт-Петербург, Российская Федерация
gvkremez@mail.ru

Аннотация. Показана целесообразность проведения натуральных экспериментов (в том числе космических) для создания и совершенствования интеллектуальных автоматических и автоматизированных систем, а также использования экспериментальных данных в учебном процессе вуза. Изложена постановка натуральных экспериментов, проведенных ВКА им. А.Ф. Можайского на космических аппаратах «Можаяец-3» и «Можаяец-4», по исследованию работоспособности микросхем генераторов тактовых импульсов и памяти в условиях влияния факторов космического пространства.

На Землю передаются параметры: информация о работоспособности комплекса «Призма-2» перед каждым включением и число отказов испытываемых микросхем за период включения, напряжение на выходе вторичного источника питания, накопленная доза ионизирующего излучения за время полета КА, температура в блоках с микросхемами. Путем анализа значений параметров микросхем определяется работоспособность испытываемых приборов в зависимости от уровня внешних воздействий, оцениваемых по информации от датчиков дозы и температуры.

Приведены экспериментальные данные по числу отказов микросхем. Получены математические выражения, позволяющие прогнозировать количество отказов и, как следствие, определять уровень рационального резервирования бортовой аппаратуры. Намечены пути развития экспериментальных исследований в рассмотренной предметной области.

Ключевые слова: космический эксперимент, бортовая аппаратура, надежность, ионизирующее излучение, число отказов микросхем.

ВВЕДЕНИЕ

Интеллектуальные технологии на транспорте развиваются в ногу со временем. На данный момент человек-оператор некоторые свои функции перекладывает на интеллектуальные системы. Поэтому одной из задач внедряемых технологий является поддержка принятия решений [1]. Важными аспектами в этом направлении являются [2]:

- контроль состояния бортового оборудования;
- повышение надежности системы;
- эффективное использование ресурсов, затрачиваемых на функционирование системы;
- решение проблем, связанных с ошибками и отказами в работе бортовой системы транспортных средств, в режиме реального времени;

- применение методов резервирования.

Бортовая система играет важнейшую роль на протяжении всего жизненного цикла транспортных средств. Следовательно, ей необходимо уделять особое внимание.

Аналогичная задача стоит и перед теми, кто занимается контролем и обеспечением процесса использования по целевому назначению космических аппаратов (КА), несмотря на то, что средой их функционирования является космическое пространство [3].

Цели и задачи экспериментальных исследований

Оценивание технического ресурса космического аппарата (КА) в процессе его эксплуатации является сложной задачей [4–6]. Расчет и моделирование в наземных условиях с достаточной точностью влияния на бортовую аппаратуру комплекса многочисленных факторов космического пространства (ионизирующих излучений, вакуума, перепадов температуры, электризации и др.) не представляется возможным из-за высокой сложности этого процесса.

Разработка технических решений, обеспечивающих увеличение ресурса бортовой аппаратуры, связана с проведением натуральных экспериментов [7]. Они позволяют эмпирическим путем интегрально оценить результаты одновременного воздействия на аппаратуру многообразия факторов космического пространства [8, 9].

Помимо научной и практической значимости экспериментальные исследования важны для решения задач обучения в вузе. В учебном процессе Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского рассматриваются методики, комплексизирующие испытания в космосе, на Земле, математическую обработку их результатов, а также моделирование.

В частности, такой подход реализуется в рамках специальности 230106 «Применение и эксплуатация автоматизированных систем» (специализация «Эксплуатация вычислительных машин, комплексов, систем и сетей»). При этом математическое образование обучающихся совершенствуется в ходе изучения дисциплин «Моделирование и проектирование систем», «Надежность автоматизированных систем», «Эксплуатация автоматизированных систем», а также при подготовке выпускной квалифика-

ционной работы в рамках Государственной итоговой аттестации.

Экспериментальные исследования проводятся на базе учебно-исследовательских малых космических аппаратов «Можаец-3» (запуск состоялся 28 ноября 2002 года) и «Можаец-4» (запуск состоялся 27 сентября 2003 года) с использованием комплексов научной аппаратуры «Призма-1» и «Призма-2». КА «Можаец-3», «Можаец-4» функционируют на орбитах, близких к круговым, высотой около 700 км, наклонением 86°.

Проводимые экспериментальные исследования предполагают разработку предложений, направленных на решение задачи увеличения длительности активного функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) отечественных КА до десяти лет и более. При этом рассматривается возможность обеспечения исправного функционирования электронной компонентной базы (ЭКБ) в условиях комплексного воздействия факторов космического пространства, разгерметизации приборного отсека КА или за его пределами.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ ТАКТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

Комплекс научной аппаратуры «Призма-1» [10] обеспечивает испытания трех генераторов тактовых импульсов. Каждый из них расположен в отдельном блоке электронных приборов (БЭП 1, 2 и 3) с толщиной корпуса 1, 2 и 3 мм соответственно. Блоки размещены на внешней поверхности космического аппарата (КА) между панелями солнечных батарей. Рядом с испытываемой аппаратурой установлены два блока с датчиками внешних воздействий (температуры, ионизирующих воздействий). Перечисленные блоки подключены к блоку сопряжения комплекса (БС), расположенному в приборном отсеке КА. Он связан с бортовым комплексом управления, системами телеметрии и энергоснабжения КА. Внешний вид комплекса научной аппаратуры «Призма-1» приведен на рис. 1.

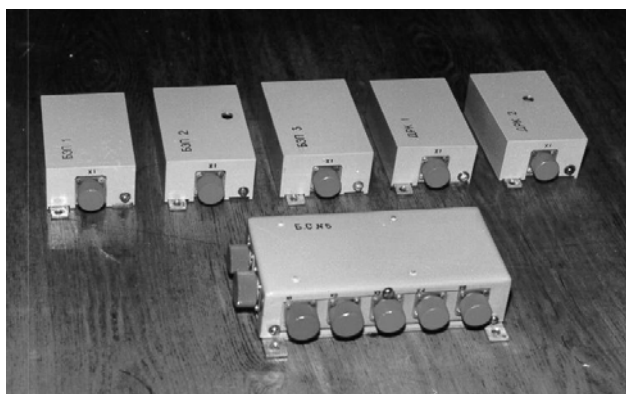


Рис. 1. Внешний вид комплекса научной аппаратуры «Призма-1»

По каналам телеметрии получено и обработано свыше 150 000 значений оцениваемых параметров комплекса «Призма-1». Определяющим телеметрическим параметром комплекса «Призма-1» является амплитуда выходного напряжения каждого из трех испытываемых генераторов. За время функционирования отмечается незначительная

деградация электрических параметров испытываемых генераторов прямоугольных импульсов (в пределах 5%). Периодичность изменения амплитуды выходного напряжения вторичного источника питания составляет около 100 минут. Период изменения температуры на борту КА равен приблизительно 100 минутам.

Значения температуры хорошо коррелируют с напряжением вторичного источника питания. Ни верхние, ни нижние значения выходного напряжения всех блоков не вышли за допустимые пределы. При этом полагалось, что значения амплитуды выходного напряжения для каждого генератора в исправном состоянии находятся в диапазоне $3,0 \pm 0,2$ В. Пример диаграммы среднего отклонения амплитуды выходного напряжения комплекса «Призма-1» представлен на рис. 2.

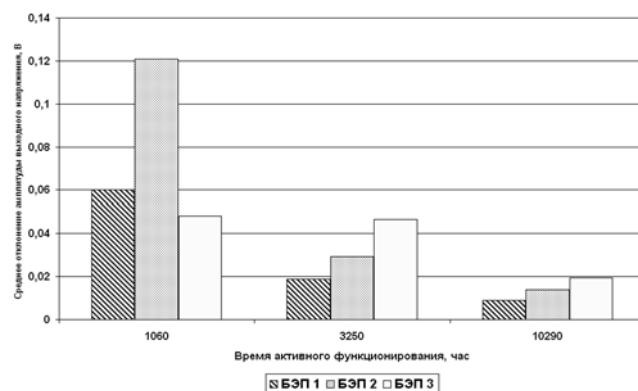


Рис. 2. Диаграмма среднего отклонения амплитуды выходного напряжения комплекса «Призма-1» в зависимости от длительности функционирования экспериментальной аппаратуры

Исходными данными для прогнозирования на основании математического анализа статистических данных о работе бортовой аппаратуры являются вектор моментов измерений (включения аппаратуры) $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n$ и вектор значений определяющего телеметрического параметра y (амплитуды) на этих интервалах времени $\{y_i\}$, $i = 0, 1, \dots, n$. В качестве математического аппарата использовались известные методы аппроксимации или приближения функциональной зависимости к изменению значений определяющих параметров.

Получены уравнения, аппроксимирующие процесс деградации амплитуды выходного напряжения генераторов каждого из трех блоков в зависимости от времени функционирования следующего вида:

$$A_{U_{\text{вых}}}(t) = a t + A_{U_{\text{вых}}0}, \quad (1)$$

где $A_{U_{\text{вых}}}(t)$ – значение амплитуды в момент времени t ; $A_{U_{\text{вых}}0}$ – при первом включении.

С учетом выражения (1) уравнения для блоков 1–3 с испытываемыми изделиями записываются соответственно:

для первого блока

$$A_{U_{\text{вых}}} = 0,00000214 t + 2,94246437; \quad (2)$$

для второго блока

$$A_{U_{\text{вых}}} = -0,00000062 t + 2,91151035; \quad (3)$$

для третьего блока

$$A_{U_{\text{вых}}} = -0,00000301 t + 2,90724837. \quad (4)$$

В результате получены зависимости, описывающие деградацию генераторов прямоугольных импульсов по амплитуде выходного напряжения при функционировании в условиях внутреннего естественного радиационного пояса Земли вне герметичного отсека КА.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МИКРОСХЕМ ПАМЯТИ

Комплекс научной аппаратуры «Призма-2» предназначен для испытания микросхем оперативной памяти компьютеров [11]. В составе комплекса «Призма-2» испытаны микросхемы статического оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), выполненные по КМОП-технологии. Данные микросхемы являются изделиями отечественной электронной промышленности высокой степени интеграции (каждая содержит около 445 500 элементов).

Внешний вид аппаратуры приведен на рис. 3. Комплекс содержит размещаемые на внешней поверхности КА аналогично комплексу «Призма-1»: четыре блока с четырьмя микросхемами оперативной памяти 537РУ16 (блоки черного цвета в правом верхнем углу на рис. 3).

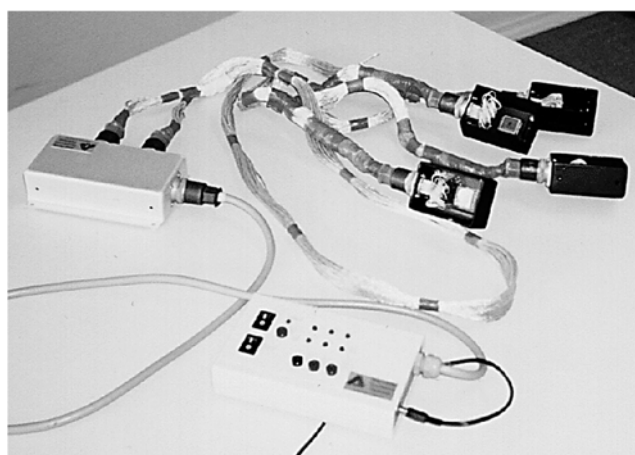


Рис. 3. Внешний вид комплекса научной аппаратуры «Призма-2»

Датчики температуры и накопленной дозы расположены совместно с испытываемой микросхемой памяти в одном из блоков. Блоки имеют толщину корпуса 1, 2 (два блока) и 3 мм. В приборном отсеке КА расположен блок согласования с бортовым комплексом управления (блок белого цвета слева на рис. 3), обеспечивающий тестирование испытываемых микросхем и передачу контролируемых параметров в систему телеметрии. Кроме того, в состав комплекса «Призма-2» входит не устанавливаемый на борту КА пульт наземного контроля, посредством которого осуществляется автономная проверка работоспособности экспериментальной аппаратуры.

При проведении экспериментальных исследований микропроцессорный блок согласования записывает в ячейки памяти испытываемых микросхем тестовые коды (все нули, все единицы, шахматный код), затем считывает содержимое ячеек и сравнивает с эталонными значениями. Количество несовпадений подсчитывается и фиксируется как число отказов микросхем.

Через систему телеметрии на Землю передаются следующие параметры: информация о работоспособности комплекса «Призма-2» перед каждым включением (слово

состояния процессора блока согласования) и число отказов испытываемых микросхем за период включения, напряжение на выходе вторичного источника питания аппаратуры, накопленная доза ионизирующего излучения за время полета КА, температура в блоках с испытываемыми микросхемами.

Путем анализа переданных значений параметров микросхем определяется работоспособность испытываемых приборов в зависимости от уровня внешних воздействий, оцениваемых по информации от датчиков дозы и температуры. Частота измерения параметров испытываемых приборов (включения комплекса) определяется этапом их эксплуатации (динамикой изменения параметров).

За время полета космического аппарата «Можжец-4» испытываемые блоки проработали в активном режиме более 400 часов. По каналам телеметрии получены и проанализированы более 20 000 значений оцениваемых параметров. Отмечается устойчивое функционирование комплекса научной аппаратуры «Призма-2». Микросхемы во втором и четвертом блоках работали стабильно. Минимальное число правильно сработавших ячеек памяти превышало 40 % и с октября 2003 года по май 2004 года уменьшилось на 15 %. Цепи обращения к испытываемым микросхемам первого и третьего блоков работали неустойчиво (их удавалось включить не более 500 раз), поэтому результаты функционирования памяти в этих блоках в дальнейшем не рассматривались.

Определяющим телеметрическим параметром комплекса «Призма-2» является среднее число работоспособных байтов (ячеек памяти) в процентах от их общего числа за интервал измерения, а также значения выходного напряжения дозиметра. Для аппроксимации зависимости доли исправных ячеек от времени пребывания КА на орбите использован многочлен второго порядка. Параметры функционирования комплекса на интервале 0–30 000 часов представлены на рис. 4.

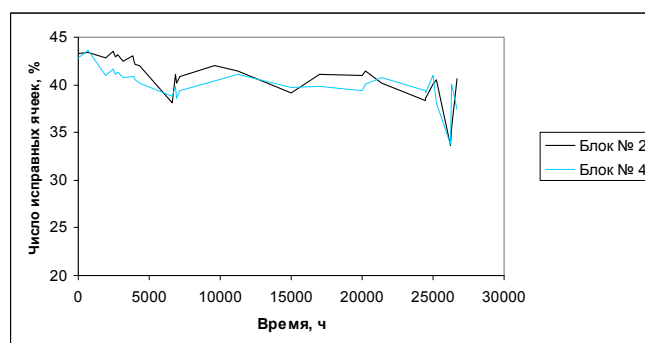


Рис. 4. Зависимости процентной доли исправных ячеек ОЗУ от времени пребывания КА на орбите

Доля исправных ячеек, бывших работоспособными в момент проведения первого измерения, аппроксимируется функцией

$$\tilde{y}(t) = -1,9548 \cdot 10^{-11} t^2 - 3,1108 \cdot 10^{-6} t + 1. \quad (5)$$

В условиях эксперимента в качестве параметра потока отказов принимается производная по времени доли ис-

правных ячеек памяти с обратным знаком, в результате чего для временного интервала проведения эксперимента получены плотность распределения отказов, $1/\tau$,

$$f(t) = e^{-1,56 \cdot 10^{-11} t} (3,91 \cdot 10^{-11} t + 3,11 \cdot 10^{-6}) \quad (6)$$

и интенсивность отказов, $1/\tau$,

$$\lambda(t) = 3,113 \cdot 10^{-6} + 3,847 \cdot 10^{-11} t + 1,675 \cdot 10^{-16} t^2. \quad (7)$$

Коэффициент корреляции между параметрами работы различных блоков равен 0,96, т. е. колебания их параметров в значительной степени взаимосвязаны, что свидетельствует о воздействии на устойчивость функционирования электронных изделий внешних факторов.

Для обобщенного оценивания надежности электронной компонентной базы, функционирующей в составе БВС в условиях, близких к условиям проведения экспериментов с КА серии «Можаец», целесообразно представить (7) в виде

$$\lambda(t) = \lambda_0 (1 + 1,236 \cdot 10^{-5} t + 5,381 \cdot 10^{-11} t^2), \lambda_0 = \lambda(0). \quad (8)$$

Таким образом формализованы зависимости интенсивности потоков отказов для ячеек ОЗУ при их работе в условиях полета КА «Можаец-4».

На основе обработки и анализа экспериментальных данных от комплексов «Призма-1, 2» получена информация о характере функционирования электронных изделий в условиях воздействия факторов космического пространства, позволившая построить модели потоков отказов электронных компонентов перспективных БВС.

Выводы

Испытания показали возможность длительной работы типовых электронных компонентов на борту КА в негерметизированных блоках. При этом микросхемы с невысокой степенью интеграции функционировали с единичными сбоями. Большие (сверхбольшие) интегральные микросхемы работали со сбоями в течение каждого интервала включения. Обеспечение надежности устройств на их основе возможно посредством реализации методов резервирования. Значительный временной интервал проведения экспериментов и объем опытных данных позволили сделать вывод о возможности и целесообразности использования полученных результатов при оценивании технических характеристик перспективных бортовых вычислительных систем КА, обладающих сроками активного существования до десяти лет.

Дальнейшая разработка предложений по рациональному построению бортовых вычислительных средств КА требует использования перспективных компонентов [12, 13] и, как следствие, постановки новых космических экспериментов [14], например, на борту Международной космической станции (МКС). Высокий качественный уровень такого космического эксперимента связан с уникальными возможностями по проведению экспериментов на борту МКС с участием ее экипажа, а также возможностью возвращения объектов испытания из космоса.

Результаты эксперимента могут иметь широкое применение для интеллектуальных систем, используемых на транспорте. Аппаратно-программный комплекс (АПК) диагностики и принятия решений может существенно модернизировать подвижной состав многих транспортных систем. АПК имеет в своей структуре два компонента:

систему поддержки принятия решения и систему самодиагностики.

Методика прогнозирования сбоев и отказов бортовой аппаратуры, разработанная по результатам проекта, является базой для построения системы поддержки принятия решений. Эта система сможет в автоматическом режиме осуществлять поиск неисправностей и предупреждать их, при этом выдавая необходимую информацию оператору.

Опыт съема телеметрической информации может применяться в системе самодиагностики. Данные, получаемые этой системой, будут направляться в систему поддержки принятия решения, что образует единый комплекс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moore, Robert C. Autonomous Safeing and Fault Protection for the New Horizons Mission to Pluto: The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Laurel, Maryland, USA, 57th, International Astronautical Congress, Valencia, Spain, 2006.
2. ECSS-E-ST-10-04C Space engineering. Space environment. – Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk, The Netherlands. – 2008. – P. 198.
3. OSACR: A compact, powerful and versatile On Board Computer based on LEON3 Core / Poupat, Gean-Luc; Lefevre, Aurelien; Koebel, Franck: Data Systems in Aerospace, DASIA 2011 Conference, 2011, San Anton, Malta.
4. Макриденко Л.А. Обзор космических факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики низкоорбитальных спутников / Л.А. Макриденко, В.Я. Геча, Н.И. Сидняев, В.В. Онуфриев // Проблемы создания и применения малых космических аппаратов и робототехнических средств: труды Всероссийской научно-практической конференции. Т. 2. – СПб., 2016.– С. 234–239.
5. Пичхадзе К.М. Расчет локальных поглощенных доз с учетом реальной конфигурации космического аппарата / К.М. Пичхадзе, Н.М. Хамидуллина, И.В. Зефиоров // Космические исследования. – 2006. – Т. 44, № 2. – С. 179–182.
6. Никифоров А.Ю. Заблуждения и реальность в области оценки радиационной стойкости электронной компонентной базы // Спелтехника и связь. – 2011. – № 4. – С. 63–67.
7. Galileo GIOVE-A MEORAD Results and Analysis / V.Taylor, C.Underwood, et al. // IEEE Transactions On Nuclear Science. – 2008. – Vol. 55. – № 6.
8. Полесский С. Обеспечение радиационной стойкости аппаратуры космических аппаратов при проектировании / С. Полесский, В. Жаднов, М. Артюхова [и др.] // Компоненты и технологии. – 2010. – № 9. – С. 93–98.
9. Koebel, Franck; Coldefy, Jean-Francois. SCOC3: a space computer on a chip An example of successful development of a highly integrated innovative ASIC: Microelectronics Presentation Days ESA/ESTEC, 2010, Noordwijk, Netherlands.
10. Басыров А.Г. Повышение устойчивости функционирования бортовых вычислительных систем по результатам космических экспериментов / А.Г. Басыров, В.А. Гончаренко, В.С. Забузов, Г.В. Кремез, К.А. Эсаулов //Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 4. – С. 70–74.

11. Захаров И.В. Построение бортовых вычислительных систем с учетом результатов испытаний элементной базы в условиях космического пространства / И.В. Захаров, Г.В. Кремез // Научное обозрение. – Саратов : ООО «Буква», 2014. – Вып. 2. – С.176–179.

12. [http://nepp.nasa.gov/MRAM technology status](http://nepp.nasa.gov/MRAM%20technology%20status), Flash memory reliability (дата обращения 01.09.2018).

13. Single-event upset in flash memories / Nichols D., Schwartz H. // IEEE Trans. Nuclear Sci. – 1997. – Vol. 44. – № 6. – Pp. 2215–2324.

14. Петров А.Г. Исследования потери информации в микросхемах флэш-памяти в активном и пассивном режимах при ионизирующем воздействии / А.Г. Петров, А.В. Уланова, А.И. Чумаков, А.Л. Васильев // Радиационная стойкость электронных систем. Стойкость-2014. – 2014. – Вып. 17. – С. 175–176.

Study of the Influence of Space Factors on the Onboard Radio-Electronic Equipment Based on the Results of Experiment on the Spacecraft «Mozhaets»

Y.R. Gorshkov, G.V. Kremez, N.V. Miheev
A.F. Mozhaisky Military Aerospace Academy
St. Petersburg, Russia
gvkremez@mail.ru

Abstract. The expediency of carrying out full-scale experiments (including space ones) for creating and improving intellectual automatic and automated systems, as well as using experimental data in the educational process of the university, is shown. Presented setting field experiments conducted by the GCA them. A.F. Mozhaisky on the spacecraft "Mozhaets-3" and "Mozhaets-4", to study the performance of the microcircuits of the clock and memory generators under the influence of space factors.

The following parameters transmitted to the Earth: information on the working capacity of the prism-2 complex before each switch-on and the number of failures of the tested chips during the switch-on period, the output voltage of the secondary power source, the accumulated dose of ionizing radiation during the SPACECRAFT flight, the temperature in the blocks with chips. By analyzing the values of the chip parameters, the efficiency of the tested devices is determined depending on the level of external influences, estimated from the information from the dose and temperature sensors.

The experimental data on the number of microcircuit failures are given. Mathematical expressions been obtained that make it possible to predict the number of failures and, as a result, to determine the level of rational redundancy of the onboard equipment. Outlined the way for the development of experimental research in the considered subject area.

Keywords: space experiment, onboard equipment, reliability, ionizing radiation, number of microcircuit failures.

REFERENCES

1. Moore, Robert C. Autonomous Safeing and Fault Protection for the New Horizons Mission to Pluto: The Johns Hopkins University Applied Physic Laboratory, Laurel, Maryland, USA, 57th, International Astronautical Congress, Valencia, Spain, 2006.
2. ECSS-E-ST-10-04C Space engineering. Space environment. – Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk, The Netherlands. – 2008. – P. 198.
3. OSACR: A compact, powerful and versatile On Board Computer based on LEON3 Core / Poupat, Gean-Luc; Lefevre, Aurelien; Koebel, Franck: Data Systems in Aerospace, DASIA 2011 Conference, 2011, San Anton, Malta.

4. Makridenko L.A., Gecha V. Y., Sidnyaev N.I., Onufriev V.V. Review of space factors affecting the performance of low-orbit satellites [Obzor kosmicheskikh faktorov vliyayushchih na ehkspluatatsionnye harakteristiki nizkoorbitalnyh sputnikov] / *Problems of creation and application of small spacecraft and robotics: proceedings of the all-Russian scientific and practical conference [Problem sozdaniya i primeneniya malyh kosmicheskikh apparatov i robototekhnicheskikh sredstv trudy vserossijskoj nauchno prakticheskoy konferencii]*. SPb, 2016, vol. 2, pp. 234–239.

5. Pichkhadze K.M., Hamidullina N.M., Zefirov I.V. Calculation of local absorbed doses taking into account the actual configuration of the spacecraft [Raschet lokalnyh pogloshchennyh doz s uchetom realnoj konfiguracii kosmicheskogo apparata] / *Space research [Kosmicheskije issledovaniya]*. 2006, vol. 44, no. 2, pp. 179–182.

6. Nikiforov A.Y. Misconceptions and reality in the field of evaluation of radiation resistance of electronic component base [Zabluzhdeniya i realnost v oblasti ocenki radiacionnoj stojkosti ehlektronnoj komponentnoj bazy] / *Special equipment and communication [Spectekhnika I svyaz]*. 2011, no. 4, pp. 63–67.

7. Galileo GIOVE-A MEORAD Results and Analysis / B.Taylor, C.Underwood, et al. // *IEEE Transactions On Nuclear Science*. – 2008. – Vol. 55. – № 6.

8. Ensuring radiation resistance of spacecraft equipment in the design [Obespechenie radiacionnoj stojkosti apparatury kosmicheskikh apparatov pri proektirovanii] / S. Poleskij, V. Zhadnov, M. Artyuhova [i dr.] // *Components and technologies [Komponenty i tekhnologii]*. – 2010, no. 9, Pp. 93–98.

9. Koebel, Franck; Coldefy, Jean-Francois. SCOC3: a space computer on a chip An example of successful development of a highly integrated innovative ASIC: Microelectronics Presentation Days ESA/ESTEC, 2010, Noordwijk, Netherlands.

10. Basyrov A.G., Goncharenko V.A., Zabuzov V.S., Kremez G.V., Ehsaulov K.A. Increase of stability of functioning of onboard computer systems by results of space experiments [Povyshenie ustojchivosti funkcionirovaniya bortovyh vychislitelnyh system po rezultatam kosmicheskikh ehksperimentov] / *News of higher educational institutions. Instrument making [Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie]*. – 2009, vol. 52, no. 4, pp. 70–74.

11. Zaharov I.V., Kremez G.V. Construction of on-Board computing systems taking into account the results of tests of the element base in space [Postroenie bortovyh vychislitelnyh system s uchedom rezultatov ispytaniy ehlementnoj bazy v usloviyah kosmicheskogo prostranstva] / *Scientific review [Nauchnoe obozrenie]*. – Saratov: OOO «Bukva», 2014, no. 2, pp.176–179.

12. <http://nepp.nasa.gov/MRAM> technology status, Flash memory reliability (accessed 1 Sept. 2018).

13. Single-event upset in flash memories / Nichols D., Schwartz H. // *IEEE Trans. Nuclear Sci.* – 1997. – Vol. 44. – № 6. – Pp. 2215–2324.

14. Petrov A.G., Ulanova A.V., Chumakov A.I., Vasilev A.L. The study of information loss in the circuits of flash memory in active and passive modes, when exposed to ionizing [Issledovaniya poteri informacii v mikroskhemah flehsh pamyati v aktivnom i passivnom rezhimah pri ioniziruyushchem vozdeystvii] / *Radiation resistance of electronic systems. «Durability-2014» [Radiacionnaya stojkost ehlektronnyh system. «Stojkost-2014»]*. – 2014, vol. 17, Pp. 175–176.

Об особенностях обмена данными между приложениями на языках высокого уровня и функциями Matlab

А.В. Красновидов, А.В. Забродин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

Санкт-Петербург, Россия,

alexkrasnovidow@mail.ru, zaw2003@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются возможности обмена данными между функциями на языке системы Matlab с приложениями на языках высокого уровня. Программы на языках высокого уровня целесообразно использовать совместно с математическими пакетами для сбора данных, управления различными технологическими процессами и выполнения других подобных действий. Характеризуются инструментальные средства организации такого обмена. Показана целесообразность интеграции приложений на языках высокого уровня и М-функции системы Matlab в случае необходимости организации ввода/вывода больших объемов данных. Обоснована целесообразность использования структурированных данных для решения этой задачи. Приводятся варианты реализации обмена данными с помощью компонентов .NET Framework.

Ключевые слова: Matlab, интеграция, системы программирования, М-функции, иерархия классов, структуры, преобразование типов.

ВВЕДЕНИЕ

Современный подход к проектированию информационных систем требует максимальной информационной совместимости различных программных приложений, работающих в единой информационной среде.

В настоящее время используется большое количество различных систем обработки данных, среди которых одной из наиболее часто используемых является система Matlab. Однако в ней практически отсутствуют средства диалогового взаимодействия с пользователями. Кроме того, программа, написанная на языке Matlab, может быть запущена на выполнение только из ее среды выполнения.

С другой стороны, программы, разработанные на языках высокого уровня C++ или C#, предоставляют пользователям развитые диалоговые средства, но плохо приспособлены для сложной математической или статистической обработки данных. Отсюда следует целесообразность объединения вычислительных возможностей специализированных систем обработки данных с диалоговыми возможностями программ на языках высокого уровня.

Технология интеграции функционала Matlab позволяет пользователям Windows-приложений максимально использовать аналитические инструменты этого пакета программ для решения следующих задач:

- оптимизационных задач любой размерности;
- получения надежных результатов финансово-экономических расчетов, в том числе в режиме on-line;

- трехмерной визуализации сложных геометрических фигур и поверхностей, имеющих экономическую сущность;

- создания алгоритмов оценки бизнеса, требующих большого объема вычислений;

- создания интеллектуальных систем управления объектами;

- моделирования экономических процессов любой степени сложности с использованием возможностей пакета Simulink.

Основные методы организации такого взаимодействия подробно рассмотрены в различных работах, например в [1, 2, 3] и других. Этими методами являются:

1) преобразование программы, написанной на языке Matlab, в программу на языке C++. Этот способ является исторически первым;

2) взаимодействие системы Matlab с Microsoft Visual Studio с помощью платформы .NET Framework.

Каждый из этих методов обладает своими преимуществами и недостатками. Подробное их сравнение приводится в [1, 4]. Здесь целесообразно отметить, что независимые приложения используют специальный режим работы компилятора msc, что приводит к трудностям передачи параметров в Matlab-функции. Кроме того, такое приложение запускается из командной строки, что приводит к ограниченному диалоговым возможностям. Фактически компилятор msc генерирует код на языке C++, эквивалентный соответствующему вызову Matlab-функции [5].

Второй метод основан на создании динамических библиотек классов в соответствии со стандартом CLR, которые могут быть использованы в любом приложении, соответствующем этим стандартам. Версии системы Matlab начиная с R2010b и выше располагают средствами создания динамических библиотек, которые могут быть использованы в программах на любых языках программирования, поддерживаемых средой выполнения CLR. В этом случае М-функции преобразуются в методы объектов, классы которых объявлены в среде CLR. Эти методы могут вызываться из программ на языках C++ или C#. Такой подход позволяет в полной мере использовать возможности системы Microsoft Visual Studio в части поддержки диалоговых средств и гибкости управления ходом вычислительного процесса. Однако при его реализации следует иметь в виду следующие особенности объявляемых классов:

- М-функции, в отличие от методов C++ или C#, могут иметь несколько выходных переменных – результатов;
- объявляемые классы не инкапсулируют данные. Они могут содержать только вызываемые методы;
- Script-файлы не могут быть преобразованы в методы и интегрированы в динамическую библиотеку.

Первая из перечисленных особенностей не является существенной в случаях, когда обращение из программы на C++ / C# происходит по методу, использующему только данные, передаваемые из вызывающей программы, и возвращает результат только в нее (автономный метод). Две другие могут привести к затруднениям в целом ряде часто встречающихся ситуаций, например в случае необходимости обмена данными между методами, содержащимися в динамической библиотеке. Примером этого может служить Matlab-программа, которая состоит из нескольких взаимосвязанных М-функций, одни из которых выполняют инициализацию общих переменных, например задают параметры некоторой модели, а другие выполняют собственно моделирование. Естественно, между этими функциями предполагается обмен различными данными. В рамках системы программирования Matlab такой обмен может быть реализован с помощью глобальных переменных, объявленных, например, в Script-файле. Однако третья особенность не дает возможности их интеграции в указанные выше динамические библиотеки. Отсюда возникает необходимость поиска иных возможностей обмена данными между взаимосвязанными М-функциями в рамках единой задачи. Одним из возможных способов представляется организация обмена данными между взаимосвязанными М-функциями через вызывающую программу на языке C++ или C#, который и рассматривается в настоящей статье.

1 ОРГАНИЗАЦИЯ ОБМЕНА ДАННЫМИ МЕЖДУ MATLAB-ФУНКЦИЯМИ И ПРОГРАММОЙ НА ЯЗЫКЕ ВЫСОКОГО УРОВНЯ

Выше было показано, что одним из вариантов организации обмена данными между взаимосвязанными М-функциями является использование вызывающей программы, написанной на одном из языков высокого уровня (C++ или C#). В этом случае общие данные располагаются в адресном пространстве вызывающей программы и передаются в вызываемые М-функции в качестве параметров. Общая схема организации такого взаимодействия подробно рассмотрена в [1]. Ниже отмечаются следующие особенности передачи данных между М-функциями и программой на языке высокого уровня.

1. Языки программирования C++ и C# являются языками со строгой типизацией данных. Все переменные должны быть объявлены до их использования. Система программирования Matlab не требует предварительного объявления переменных и их типа.

2. Методы в приложениях на C++ и C# имеют один возвращаемый с помощью оператора return выходной параметр некоторого типа или не имеют выходного параметра (тип void). М-функции могут иметь несколько возвращаемых выходных переменных. В общем случае заголовок М-функции имеет вид:

```
function [y1, y2,...,yn] = <имя_функции> (<Список_Входных_Переменных >).
```

Таким образом, выходные переменные представляют собой вектор-строку с элементами y_1, y_2, \dots, y_n , при этом все они в свою очередь могут быть матрицами или векторами. В процессе выполнения М-функции всем выходным переменным должны быть присвоены значения. Примером такой функции может служить функция meshgrid, использующаяся совместно с функциями построения графиков трехмерных поверхностей. Обращение к этой функции имеет вид:

$[X,Y] = \text{meshgrid}(x)$, где X и Y – выходные векторы (результат работы функции).

Из изложенного выше следует, что основным моментом при организации взаимодействия между М-функцией и программой на языке C++ / C# является согласование типов передаваемых данных и выполнение отображения множества выходных переменных М-функции на соответствующие переменные вызывающей программы на C++ / C# и обратно. При решении этой задачи предлагается использовать библиотеку классов .NET MWArray для работы с массивами MWArray.dll. Эта динамическая библиотека содержит два пространства имен:

- MathWorks.Matlab.NET.Arrays – классы, которые обеспечивают доступ к массивам Matlab из любого .NET CLS-совместимого языка;
- MathWorks.Matlab.NET.Utility – сервисные классы, оказывают общую поддержку классов MWArray в среде исполнения компонента Matlab MCR.

Пространство имен MathWorks.Matlab.NET.Arrays содержит классы для поддержки преобразования данных между управляемыми типами и типами Matlab. Каждый класс имеет конструкторы, деструкторы и набор свойств и методов для того, чтобы обращаться к состоянию основного массива Matlab. Иерархия классов MathWorks.Matlab.NET.Arrays представлена на рис. 1.

MWArray – это абстрактный класс, корень иерархии классов массивов Matlab. Он инкапсулирует внутренний тип Matlab mxArray и обеспечивает возможность обращения, форматирования и управления массивом.

MWNumericArray – управляемое представление для массивов Matlab числовых типов. Его эквивалент Matlab – это заданный по умолчанию тип массива (вектора) double, используемый большинством математических функций Matlab.

MWLogicalArray – управляемое представление для массивов Matlab логического типа. Как и его эквивалент Matlab, MWLogicalArray содержит только единицы и нули (true/false).

MWCellArray – управляемое представление для массивов ячеек Matlab. Каждый элемент в массиве ячеек – это контейнер, который может содержать MWArray или один из его производных типов, включая другой MWCellArray.

MWCharArray – управляемое представление для массивов Matlab символьного типа. Как и его эквивалент Matlab, MWCharArray поддерживает создание строк и манипуляции со строками.

MWIndexArray – это абстрактный класс, который служит корнем для классов индексации MWArray. Эти классы представляют типы массивов, которые могут использоваться как входные параметры для оператора индексации массива [].

MWObjectArray – это специальный подкласс MWArray, который инкапсулирует собственный объект

.NET в массиве Matlab. Этот объект затем может быть доступен или возвращен функцией Matlab.

MWStructArray – управляемое представление для массивов структур Matlab. Как и его эквивалент Matlab, он состоит из имен полей и значений полей.

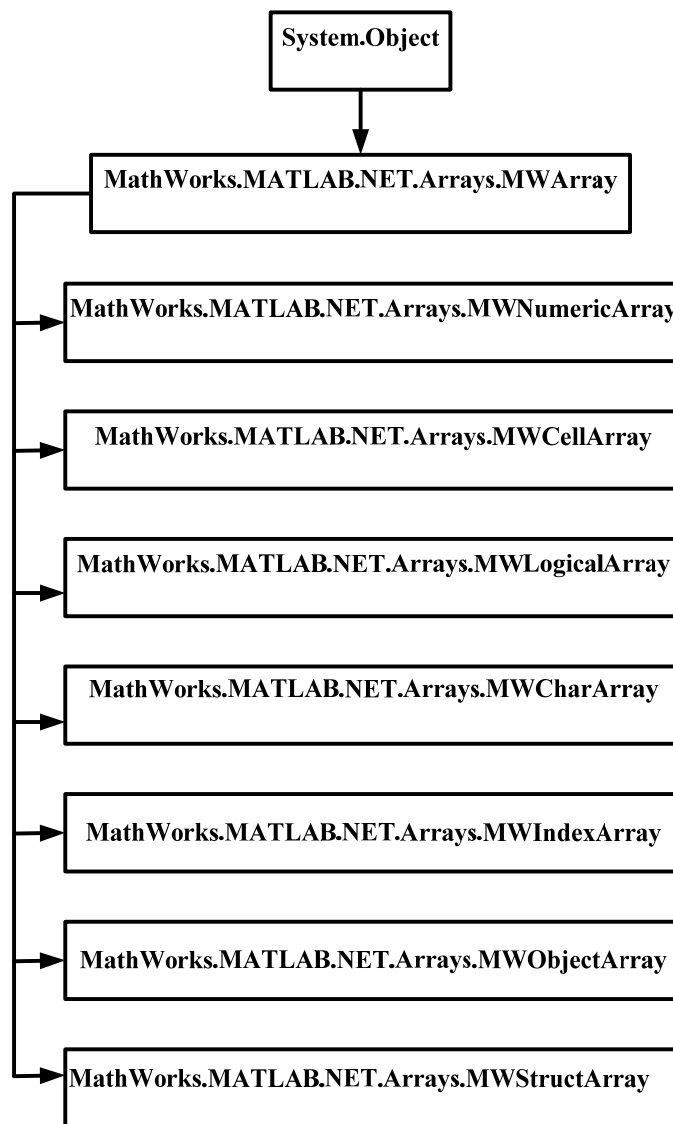


Рис. 1. Иерархия классов MathWorks.Matlab.NET.Arrays.MWArray

Пространство имен MathWorks.MATLAB.NET.Utility. Сервисные классы в этом пространстве имен оказывают общую поддержку классов MWArray в среде исполнения компонента MATLAB MCR.

Приведенная иерархия классов дает возможность легко выполнять преобразование данных из формата C++ / C# в формат Matlab и обратно, не прибегая к явному преобразованию типов. Ниже приводятся примеры подобных преобразований.

- Переменные скалярного типа double никаких преобразований не требуют.

- Одномерный массив (вектор) для передачи в M-функцию может быть сформирован следующими операторами:

```
double [ ] Coeff = {1,2,3,4}; // Вектор в C++/C#;
MWNumericArray MTLBCoeff = Coeff; // Вектор для
передачи в M-функцию в качестве параметра.
```

- Двумерный массив для передачи в M-функцию может быть сформирован следующими операторами (*):

```
double [,] a = { { 1, 2, 3 }, { 4, 5, 6 }, { 7, 8, 9 } }; // Матрица в C++ / C#;
```

```
MWNumericArray arr1 = a; // Матрица для передачи в М-функцию в качестве параметра.
```

- Строковая переменная типа string преобразуется в символьный формат Matlab для передачи в М-функцию с помощью следующего оператора:

```
string My_String = "Это – строка C#";
MWCharArray mw_ My_String = new MWCharArray(My_String);
```

- Вектор типа MWArray, возвращаемый М-функцией в программу на C++ / C#; преобразуется в массив типа double с помощью следующих операторов:

```
MWArray[] Res = null; // Объявление объектов класса MWArray
MWNumericArray descriptor = null; // и MWNumericArray
// выбор первого элемента из массива MWArray и преобразование в
// числовой тип MWNumericArray;
descriptor = (MWNumericArray)Res[0];
// преобразование массива MWNumericArray к массиву типа double;
double [,] d_descriptor
=(double[,])descriptor.ToArray(MWArrayComponent.Real);
```

Таким образом, классы MWArray используются для обработки массивов, определения типа и преобразования данных. Ниже рассматриваются примеры обмена данными между М-функциями и приложениями на языке C#.

2 ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Пусть имеется последовательность чисел x_n , представляющая собой ряд равноотстоящих измерений некоторой величины $x(t)$, в котором n – целое ($n = 0, 1, 2, \dots$), t – непрерывная переменная. Если последовательность y_n вычисляется по формуле

$$y_n = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k x_{n-k} ,$$

то эта формула определяет цифровой нерекурсивный фильтр [6].

Из формулы видно, что работа фильтра полностью определяется набором коэффициентов c_k .

М-функция MainF принимает в качестве параметров набор коэффициентов фильтра и имя двоичного файла, в котором содержатся обрабатываемые данные. Возвращаемыми результатами являются векторы, содержащие исходный вектор и вектор результатов обработки.

```
function [ OutMatrix ] = MainF(File,Coeff)
%UNTITLED Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
% File – символьное имя файла; Coeff – массив
(вектор) коэффициентов.
fid2 = fopen(File,'r');
InV = fread(fid2,'double'); % InV – исходный вектор
```

```
fclose(fid2);
Arg = length(InV);
OutV = Filter (T,InV); % Обращение к М-функции, реализующей фильтр
% OutV – выходной вектор
OutMatrix = [InV OutV']; % Формирование вектора строки выходных переменных
plot(1:Arg,InV,1:Arg,OutV); % Построение графика результатов
```

М-функция MainF объявлена как метод CLR-класса TFilter. Объявлять методом М-функцию Filter нет необходимости, так как ее вызов производится из функции, внешней по отношению к ней [2, 4]. Так как при обработке данных может возникнуть необходимость фильтрации различных их вариантов различными фильтрами, то представляется целесообразным организовать ввод имени файла и векторов коэффициентов из приложения на языке C++ / C#.

Такое приложение должно выполнять следующие действия:

1. Получить от пользователя название обрабатываемого файла в символьном виде и преобразовать его к формату, принятому в Matlab.

2. Получить от пользователя вектор коэффициентов фильтра в символьном (удобном для пользователя) виде и преобразовать их к формату, принятому в Matlab.

3. Создать объект класса TFilter, содержащий метод фильтрации.

4. Вызывать метод MainF класса TFilter и передать ему параметры (аргументы), которые преобразованы в формат Matlab.

5. Получить исходный и обработанный векторы возвращаемых М-функцией MainF, переведя их в формат C# (в тип MWNumericArray – управляемое представление типов числовых массивов Matlab).

6. Вывести полученные векторы в визуальный элемент listBox (если это необходимо).

Ниже приводятся фрагменты такого приложения, выполняющие перечисленные действия.

```
// Объявление переменных
string File_Name; // Имя файла данных в строковом формате C#
MWArray [ ] Res = null; // Объявление объектов класса MWArray
MWNumericArray Vect = null; // и MWNumericArray для результатов работы
// М-функции
double[ , ] OutV; // Матрица, в которую будут преобразованы результаты работы
// М-функции
string SCoeff; // Строка в формате C# для ввода коэффициентов фильтра
double [ ] Coeff; // Массив (вектор) для передачи в М-функцию
-----
// Преобразование имени файла из типа string в символьный формат Matlab
```

```
MWCharArray mw_Name = new MWCharArray(File_Name);
```

Выше было показано, что одним из передаваемых в М-функцию параметров является массив (вектор) коэффициентов, определяющий свойства цифрового фильтра. Их значения вводятся в диалоговом режиме, поэтому количество этих коэффициентов заранее неизвестно. С точки зрения М-функции MainF это не имеет значения, так как все массивы Matlab по определению являются динамическими. Однако в С#-массив – всегда статическая структура, размер которой должен быть определен заранее. Поэтому рассмотренное выше преобразование не может быть использовано непосредственно. Для преодоления указанного противоречия в приложении на С# была создана динамическая структура – список, который затем преобразуется в массив нужного размера.

```
List<double> TMP = new List<double>(); // Шаблон для организации списка
// заполнение списка введенными коэффициентами
// .....
// .....
Coeff = TMP.ToArray(); // Преобразование списка в массив
MWNumericArray MTLBCoeff = Coeff; // Преобразование числового массива из //формата С# в числовой массив в формате //Matlab
```

```
TFilter Filter = new TFilter(); //Создание объекта класса TFilter
Res = Filter.MainF(1, mw_Name, MTLBCoeff); // Вызов метода MainF
//выбор первого элемента из массива MWArray и преобразование в
// числовой тип MWNumericArray;
Vect = (MWNumericArray)Res[0];
int Size = Vect.NumberOfElements;
OutV = new double[Size/2, Size/2]; // Инициализация матрицы результатов
for (int i = 0; i < Size / 2; i++)
{ // Заполнение матрицы результатов размерностью (2× Size / 2)
OutV[1, i] = Vect[i + 1].ToScalarDouble();
OutV[2, i] = Vect[i + Size / 2 + 1].ToScalarDouble();
// Вывод результатов в визуальный элемент listBox
listBox1.Items.Add(i.ToString() + " " + OutV[1, i] + " " + OutV[2, i]);
}
```

Метод ToScalarDouble() класса MWNumericArray преобразует скалярные значения формата Matlab в тип double C#. Таким образом, в данном случае требуется явное преобразование типов. Результат работы приложения представлен на рис. 2.

В рассмотренном примере метод (М-функция) Filter инкапсулирована в метод MainF, поэтому первая не является методом CLR-класса Tfilter и нет необходимости организовывать обмен данными между ними.

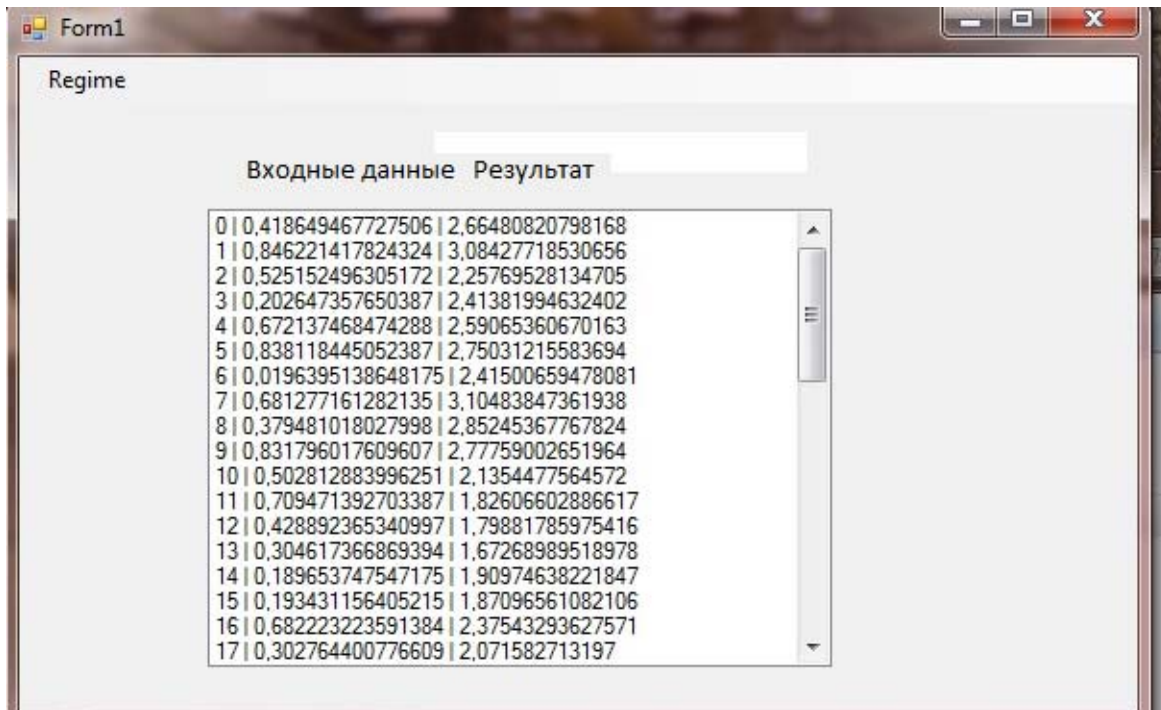


Рис. 2. Результат работы приложения

Следует отметить, что использование listBox не является единственным вариантом визуализации результатов работы приложения.

3 ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИЛУЧШЕЙ ТОЧКИ ДОСТУПА ДЛЯ ПОДКЛЮЧЕНИЯ МОБИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА К ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ

В статье [7] рассмотрен алгоритм определения наилучшей точки доступа для подключения мобильного устройства к локальной сети, учитывающий не только уровень сигнала на его входе, но и ширину полосы про-

пускания, которая может быть выделена очередному мобильному абоненту при попытке его подключения. Для решения этой задачи была построена модель-алгоритм выбора такой точки. Построение было выполнено с помощью аппарата нечеткой логики с использованием визуального программирования в среде Matlab. Такая модель может быть сохранена в файле с расширением .fis и в дальнейшем загружена в Matlab-программу [8]. После ввода в модель исходных данных производится собственно моделирование. Структурная схема программной модели представлена на рис. 3.

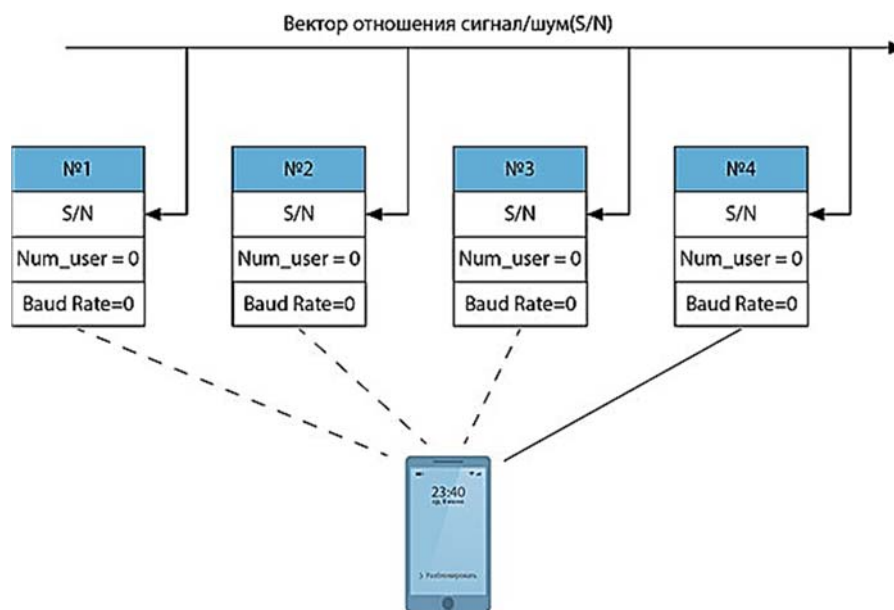


Рис. 3. Структурная схема программной модели

Каждая точка доступа представлена структурой, содержащей следующие поля данных:

- порядковый номер точки доступа (double P_Number);
- текущее значение уровня сигнала в этой точке (double Signal_Level);
- текущее количество подключенных к этой точке абонентов (double Dev_Number);
- текущее время передачи кадра этой точкой (double Baud_Rate).

При инициализации модели указанные структуры объединяются в вектор. При инициализации количество подключённых абонентов (Num_user), скорость передачи данных (Baud_Rate) устанавливаются равными нулю, значение уровней сигнал / шум (S/N) формируется вектором значений уровней сигнал / шум по заданному закону распределения. Текущая скорость передачи данных (Baud_Rate) рассчитывается с учётом количества абонентов. В дальнейшем после каждого подключения в каждой точке производится пересчет количества абонентов, рассчитывается скорость передачи данных точки, в которой произошло подключение. Данные этой точки меняются и перезаписываются. Моделирующая программа состоит из нескольких М-функций, связанных общими данными, и

вызываются из Script-файла, содержимое которого представлено ниже.

```
Node = Init1('D:\AVK\MyC#\MTLB_Integr\Fuzzy\MobileWiFi.fis',N);
Smple = Start_Rnd();
Step = 1;
while (Step < N)
    Res1 = ModelF(Node,Smple,Step);
    Node = Res1.ND;
    Step = Step+4;
end;
Print(Res1);
```

М-функция Init1 формирует массив структур в соответствии с рис. 3 и загружает файл модели;

М-функция Start_Rnd формирует значение общей полосы пропускания и значения уровней C/Ш по заданному закону распределения;

М-функция ModelF выполняет моделирование в соответствии с вышеприведенным алгоритмом;

М-функция Print осуществляет вывод результатов моделирования в виде графиков и отображает ход процесса моделирования.

Все перечисленные М-функции связаны общими данными: массивом структур, показанным на рис. 3. Для ра-

боты приведенного выше Script-файла требуется ввод параметров моделирования: имени файла-модели, количества циклов моделирования, параметров закона распределения и т.п. Кроме того, вывод информации на монитор в соответствии с принципами работы среды Matlab, а также запуск Script-файла возможны только при работе в этой среде. Отсюда следует целесообразность организации взаимодействия перечисленных выше M-функций и приложения на языке C++ / C#. Как и в предыдущем примере, эти функции должны быть методами CLR-класса (в рассматриваемом примере – TFuzzy). Фактически такое приложение должно реализовывать функциональность рассмотренного выше Script-файла. Такое приложение должно выполнять следующие действия:

- 1) получить от пользователя название файла-модели в символьном виде и преобразовать его к формату, принятому в Matlab;
- 2) получить от пользователя количество циклов моделирования, размерность массива структур в символьном (удобном для пользователя) виде и преобразовать их к формату, принятому в Matlab;
- 3) создать объект CLR-класса TFuzzy, содержащий методы Init1, Start_Rnd, ModelF, Print;
- 4) вызывать перечисленные выше методы класса TFuzzy в соответствии с алгоритмом моделирования, передавая ему параметры (аргументы), которые преобразованы в формат Matlab.

Ниже приводятся фрагменты такого приложения, выполняющие перечисленные действия.

```
// Объявление переменных
-----
string SPar; // 1
string File_Name; // 2
double Par; // 3
double Step; // 4
MWArray [ ] mod = null; // 5
MWArray [ ] Res = null; // 6
MWArray [ ] Param = null; // 7
MWStructArray Point = null; // 8
MWStructArray Result = null; // 9
```

Строки 1–4 не нуждаются в комментариях, их назначение аналогично подобным переменным, рассмотренным в предыдущем примере. Объект mod класса MWArray (строка 5) нужен для хранения дескриптора загружаемого файла модели. Этот дескриптор является объектом класса struct системы программирования Matlab [8] и передается в приложение методом Init1 CLR-объекта Model класса TFuzzy. Объект Res (строка 6) класса MWArray служит для хранения результата очередного шага моделирования, возвращаемого методом ModelF CLR-класса Model. Результат является объектом класса struct системы программирования в соответствии с рис. 3. Объект Param класса MWArray (строка 7) служит для хранения текущих параметров сеанса моделирования и принадлежит классу struct системы программирования. Объекты Point и Result класса MWStructArray (строки 8, 9) предназначены для хранения

и преобразования массивов структур в соответствии с рис. 3.

```
TFuzzy Model = new TFuzzy(); // 10
MWCharArray Mod_Name = new MWCharArray(File_Name);
MWNumericArray Number; // 11
panel1.Visible = false;
mod = Model.Init1(1, Mod_Name); // 12
Point = (MWStructArray)mod[0]; // 13
Param = Model.Start_Rnd(1); // 14
Step = 1;
while (Step < Par)
{
    Res = Model.ModelF(1, (MWArray)Point, (MWArray)Param[0], Step); // 15
    Result = (MWStructArray)Res[0]; // 16
    Point = (MWStructArray)Result.GetField("ND").Clone(); // 17
    Number = Result.GetField("N").ToArray(); // 18
    listBox1.Items.Add("Подключение к точке №: " + (Number.ToScalarDouble()).ToString());
    Step = Step + 4; // 19
};
listBox1.Visible = true;
Model.Print(0, Result); // 20
```

Оператор в строке 10 создает объект Model CLR-класса TFuzzy. Объект Number класса MWNumericArray служит для преобразования форматов между приложением и соответствующими методами CLR-класса Model (класс MWNumericArray – управляемое представление типов числовых массивов Matlab) [4, 5]. Оператор в строке 12 выполняет инициализацию модели, передавая в качестве параметра имя файла модели (см. предыдущий пример). Как было показано выше, метод Init1 возвращает дескриптор модели, в рассматриваемом случае имеющий структуру, показанную на рис. 4:

```
name: 'MobileWiFi#1'
type: 'mamdani'
andMethod: 'min'
orMethod: 'max'
defuzzMethod: 'centroid'
impMethod: 'min'
aggMethod: 'max'
input: [1x2 struct]
output: [1x1 struct]
rule: [1x9 struct]
```

Рис. 4. Структура дескриптора модели

Как и в предыдущем примере, оператор в строке 13 выбирает первый элемент из массива, но в данном случае массив состоит из структур, поэтому здесь применяется соответствующее преобразование типов. Оператор в строке 14 получает структуру, содержащую текущие параметры сеанса моделирования. Операторы в строках 15–18 работают в цикле и выполняют следующие действия:

- вычисление модели, заключающееся в определении наилучшей точки доступа на данном шаге моделирования (строка 15). Метод ModelF принимает в качестве параметров структуры Point и Param (см. выше) и возвращает результат Res класса struct, показанный на рис 5. Так как последняя является массивом, то выполняется совмещение с его первым элементом;
- приведение результата моделирования на очередном шаге к классу struct (строка 16), что необходимо для вычисления модели на следующем шаге (строка 15);

- глубокое копирование текущих значений параметров моделирования для передачи в метод ModelF (строка 17), что необходимо для вычисления модели на следующем шаге (строка 15);
- извлекает номер точки доступа, к которой произошло подключение на текущем шаге моделирования. Это необходимо для визуализации порядка подключений (строка 19);
- графическую визуализацию результатов моделирования (строка 20).

Использование объектов класса struct позволяет организовать хранение общих данных методов CLR-класса Model в приложении, реализованном на языке C#. Рассмотренные выше структуры данных, использованные в приложении, показаны на рис. 5. На рис. 6 и 7 показаны результаты работы приложения: на рис. 6 приведена динамика подключений абонентов к точкам доступа, на рис. 7 – окончательные результаты моделирования.

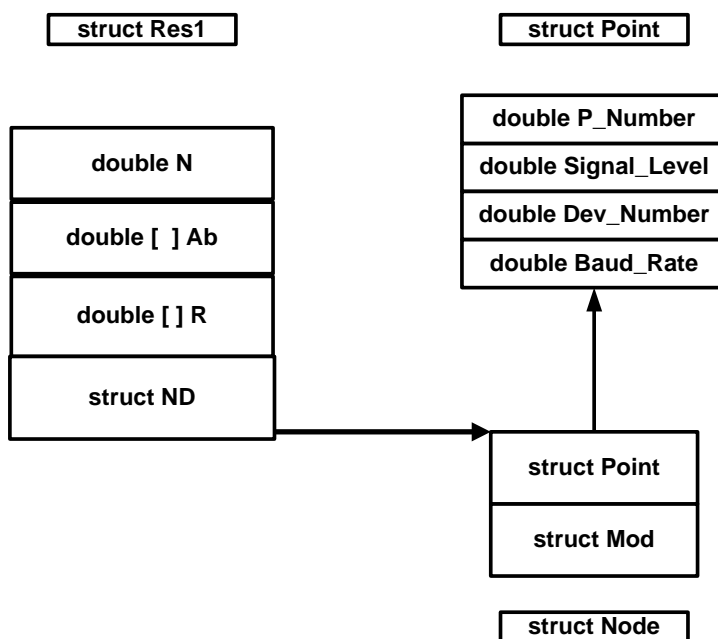


Рис. 5. Структуры данных приложения

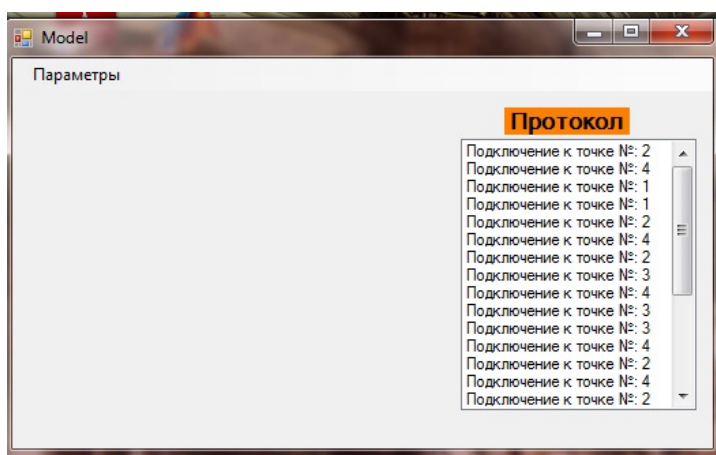


Рис. 6. Результат работы приложения с визуализацией промежуточных результатов

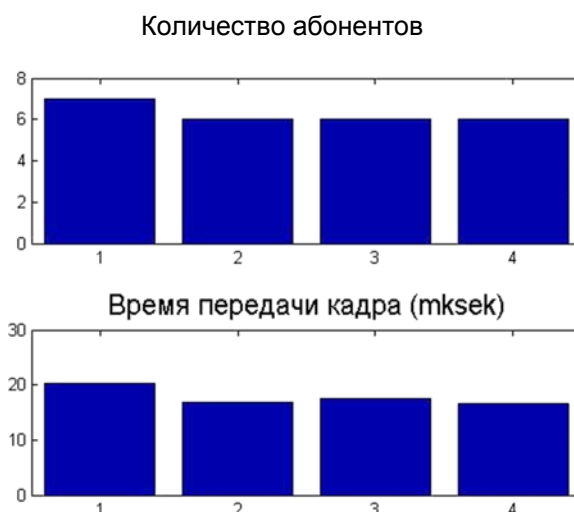


Рис. 7. Результат работы приложения с визуализацией окончательных результатов (метод Print)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ рассмотренных методов взаимодействия системы Matlab с программами на языках C++ и C# в рамках среды разработки приложений Microsoft Visual Studio позволяет сделать следующие выводы:

1. Интеграция возможностей системы Matlab с приложениями на языках программирования высокого уровня расширяет возможности разработки прикладного программного обеспечения для решения различных задач, требующих как удобного диалога с пользователем, так и выполнения сложных математических вычислений с графической визуализацией результатов.

2. В силу невозможности преобразования Script-файлов в методы CLR-классов и их интеграции в динамические библиотеки обмен данными между связанными методами внутри CLR-класса организовать нельзя.

3. Обмен данными между связанными методами можно организовать через приложение на языке высокого уровня, передавая ему соответствующие параметры.

4. При передаче параметров методами следует учитывать, что M-функции, в отличие от методов C++ или C#, могут иметь несколько выходных переменных – результатов. Отсюда следует, что основным моментом при организации взаимодействия между M-функцией и приложением на языке высокого уровня является согласование типов передаваемых данных и выполнение отображения множества выходных переменных M-функции на соответствующие переменные вызывающей программы на C++ / C# и обратно. Для решения этой задачи предлагается использовать библиотеку классов .NET MWAarray для работы с массивами MWAarray.dll. Эта библиотека дает возможность легко выполнять преобразование данных из формата C++ / C# в формат Matlab и обратно, не прибегая к явному преобразованию типов.

1. Использование объектов класса struct позволяет организовать хранение сложных данных методов классов CLR в приложении, реализованном на C#. В этом

случае сопоставление набора выходных переменных M-функций с соответствующими переменными приложения в C++ / C# и обратно может быть организовано путем объединения данных в структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы интеграции инструментальных систем в процессе разработки безопасных приложений / С.Е. Ададуров, А.В. Красновидов, А.Д. Хомоненко, И.В. Коротеев // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2017. – № 4. – С. 80–86.

2. Смоленцев Н. К. Создание Windows-приложений с использованием математических процедур Matlab. – М. : ДМК-Пресс, 2008. – 456 с.

3. Об особенностях взаимодействия между системой Matlab и приложениями с помощью технологии COM / А.В. Красновидов, А.В. Забродин, А.Д. Хомоненко // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке : сб. трудов XII Санкт-Петербургского конгресса, Санкт-Петербург, 12–30 ноября 2018 г. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. – С. 126–127.

4. Инг Бей, Джифенг Ксу. Взаимодействие MATLAB с ANSI C, Visual C++, Visual Basic и Java. – М. : Вильямс, 2005. – 207 с.

5. MATLAB C/C++ Book for MATLAB Compiler 4.5. – LePhan Publishing. – <http://www.lephanpublishing.com/MATLABBookCplusplus.html>.

6. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры / пер. с англ. ; под ред. А.М. Трахтмана. – М. : Советское радио, 1980. – 224 с.

7. Красновидов А. В. Модель алгоритма определения наилучшей точки доступа для подключения мобильного устройства к локальной сети // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2016. – № 2. – С. 36–42.

8. Леоненко А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.

On the Peculiarities of the Exchange of Data Between Applications in High-Level Languages and Matlab Functions

A.V. Krasnovidow, A.V. Zabrodin
Emperor Alexander I Petersburg State Transport University
St. Petersburg, Russia
alexkrasnovidow@mail.ru, zaw2003@yandex.ru

Abstract. The possibilities of data exchange between functions in the language of the Matlab system with applications in high-level languages are considered. Programs in high-level languages appropriately to use in conjunction with mathematical packages to collect data, control various technological processes, and perform other similar actions. The instrumental means of organizing such an exchange are characterized. It had been shown the feasibility of integrating applications in high-level languages and the M-function of the Matlab system, if necessary, to organize input/output of large amounts of data. The expediency of using structured data to solve this problem is justified. Presents options for the implementation of data exchange using the .NET Framework components.

Keywords: Matlab, integration, programming systems, M-functions, class hierarchy, structures, type conversion.

REFERENCES

1. Metody integracii informacionnykh sistem v protsesse razrabotki bezopasnykh prilozheniy [Methods of integration of instrumental systems in the development of secure applications] / S. Adadurov, A. Krasnovidow, A. Chomonenco, I. Koroteev // Information security issues. Computer systems. – 2017. – № 4. – Pp. 80–86.
2. Smolentsev N. Sozдание Windows-prilozhenii s ispolzovaniem matematicheskikh protsedur Matlab [Creating Windows applications using Matlab mathematical procedures]. – M. : DMK_Press, 2008. – 456 pp.
3. Ob osobennostiah vzaimodeistvia mezhdou sistemoi Matlab i prilozheniiami s pomoschiu tehnologii COM [About the features of the interaction between the Matlab system and applications using COM technology] / A. Krasnovidow, A. Zabrodin, A. Chomonenco // Professional education, science and innovations in the XXI century. Collection of works of the XII St. Petersburg Congress. – 2018. – Pp. 126–127.
4. Ing Bey, Dzhifeng Ksu. Vzaimodeistvie Matlab s ANSI C, Visual C ++, Visual Basic i Java, [Interaction of MATLAB with ANSI C, Visual C ++, Visual Basic and Java]. – M. : Williams, 2005. – 207 p.
5. MATLAB C/C++ Book for MATLAB Compiler 4.5. – LePhan Publishing. – <http://www.lephanpublishing.com/MATLABBookCplusplus.html>.
6. Hemming R. Tsifrovie filtry. [Digital filters] // Ed. A. M. Trahtman. – M. : Sovetskoe radio, 1980. – 224 p.
7. Krasnovidow A. Model algoritma opredelenia nailut-shei tochki dostupa dla podklucheniya mobilnogo ustroistva [Model of algorithm to determine a best access point to connect a mobile device to the LAN] // Intellectual Technologies on Transport. – 2016. – № 2. – Pp. 36–42.
8. Leonenko A. Nechetkoie Modelirovanie v Srede Matlab i fuzzyTECH. [Fuzzy modeling in MATLAB environment and fuzzyTECH]. – Saint-Petersburg : BHV-Petersbourg [Link], 2005. – 736 pp.

The Algorithm of Optimization Realized by the Stochastic Processor

S.G. Svistunov
 Emperor Alexander I Petersburg State Transport University
 St. Petersburg, Russia
 ssg47@mail.ru

Abstract. In the measuring technique, a radar-location, hydro acoustics often it is required to solve an adaptive problem of identification, i.e. to construct model on available data about object. As examples problems of a statistical estimation of parameters can serve, to regress, the analysis of data etc. In article is offered to be used for the decision of the specified problem by the adaptive quasigradient algorithm realized by a stochastic computer. The offered approach gives the chance to reduce time of the decision and to simplify used hardware. In the article the detailed algorithm of a specialized computer is resulted.

Use of a stochastic computer allows excluding "slow" operations: erection in material degree, multiplication and division of multidigit numbers. It has allowed reducing time of performance of separate iterations that at a casual signal on a device input reduces general time of definition of an extremum of function of regression.

The modified variant of adaptive stochastic algorithm which the CODE-PROBABILITY can be realised on the stochastic processor with the linear converter is offered. The proof of convergence of a method is described.

Keywords: an extremum of function of regress, adaptive algorithms of stochastic optimization, stochastic computers, the converter a code-probability.

INTRODUCTION

For the decision of many problems often it is required to define a point of a minimum (maximum) of function of regress. For example, at an estimation of those probabilities or other events. In work [1] the effective algorithm of definition of a minimum of function of regression which is adaptive is resulted and allows to reach quickly vicinities of a minimum of function of regression. This property favourably distinguishes it from classical algorithms of stochastic approximation [2, 3].

Use of this algorithm demands performance enough labour-consuming calculations of the operator, namely, scalar multiplication of vectors and erection in material degree. At information processing in real time it is desirable to avoid use of similar operations and to replace with their more simple (less labour-consuming), namely: multiplication to replace with logic operation, for this purpose it is necessary to present the information not in the form of multidigit binary numbers, and in the form of probability of occurrence 0, or 1 [4]. In material degree it is possible to replace erection with number 2 erection in the integer degree. And then exponentiation operation will be replaced with simple operation of shift. Proceeding from the aforesaid, the modified variant of adaptive stochastic algorithm is offered.

THE BASIC DESIGNATIONS

LCCP – the linear converter a code-probability [4].

SQG – stochastic quasi-gradient [1].

U_+ – step function

a.c. – almost certainly (with probability 1)

$M_s[\cdot]$ – Conditional population mean

$\|\cdot\|$ – norm of R^n

∂f – Function subdifferential f

π_x – The operator of designing of a point on set X

Z – set of integers

R^n – N -dimensional material space

$U[0, c]$ – the uniform law of distribution of probabilities in an interval $[0, c]$

s – number of a step of iteration

$\langle \cdot, \cdot \rangle$ – Scalar product of vectors

$\hat{f}(x)$ – The generalised gradient of function $f(x)$

ent – function of allocation of the integer part of number

$|\langle x, y \rangle| \leq \|x\| \cdot \|y\|$ – Schwarz's inequality

∇ – The operator of Hamilton

ALGORITHM OF STOCHASTIC OPTIMISATION

As shown in [4], on exit LCCP there is a vector of random variables $\beta^s = (\beta_1^s, \dots, \beta_n^s)$, where

$$\beta_k^s = \text{sign}(\xi_k^s) u_+ \left(|\xi_k^s| - \alpha^s \right), k = 1, \dots, n$$

and ξ_k^s – components SQG on a step of iteration which is the initial information, α^s – in regular intervals distributed random numbers in a range from 0 to $c = 2^l$. The vector $\gamma^s = c\beta^s$ will be SQG. Theorems are put In a basis of the modernised algorithm of stochastic optimisation 1 and 2, and as initial data will be SQG γ^s , the basis of degree $a = 2$ and instead of material degree undertakes its integer part on function ent. Everywhere further casual events $\omega \in \Omega$, where (Ω, F, P) – likelihood space are considered.

The theorem 1. Let $f(x)$ – convex (it is possible, rough) the function set on convex compact set $X \subset R^n$. Function satisfies to condition Lipschitz's on X .

If it is carried out:

$$a_s = a > 1, \quad s = 0, 1, \dots, \max_{x, y \in X} \|x - y\| = c_1 \quad \text{and} \quad x, y \in X,$$

$$\|\xi^s\| \leq c_2 \quad \text{a.c.} \quad s = 0, 1, \dots \quad \text{And} \quad b^s \rightarrow 0 \quad \text{a.c.} \quad \text{At} \quad s \rightarrow \infty$$

$\bar{\rho} > 0, \quad \delta \geq 2 \log[M_s a^{\|\xi^s\| c_2}] \quad \text{a.c.} \quad s = 0, 1, \dots$, then with probability 1 all limiting points of sequence $\{x^s\}$ (set by parities):

$$x^{s+1} = \pi_x(x^s - \rho_s \xi^s), \quad \rho_{s+1} = \min\{\bar{\rho}, \rho_s a^{-\langle \xi^{s+1}, \Delta x^{s+1} \rangle - \rho_s}\}$$

and $M[\xi^s / F_s] = M_s \xi^s \in \partial f(x^s) + b^s \quad s = 0, 1, \dots$, where σ – the algebra F_s is defined by random variables $(x^0, \xi^0, \dots, x^{s-1}, \xi^{s-1}, x^s)$ and $\zeta^s = \xi^s - \hat{f}_x(x^s)$ where $\hat{f}_x(x^s) \in \partial f(x^s)$, $M_s \xi^s = \hat{f}(x^s) + b^s$ belong to set $X^* = \{x^* \in X : f(x^*) = \min_{y \in X} f(y)\}$. The theorem proof is resulted in [1].

CONVERGENCE OF THE MODIFIED VARIANT OF ADAPTIVE STOCHASTIC ALGORITHM

The theorem 2. Let $f(x)$ – convex (it is possible, rough)

the function set on convex compact set $X \subset R^n$. Function satisfies to condition Lipschitz's on X.

If it is carried out:

$$\max_{x, y \in X} \|x - y\| = c_1 \tag{1}$$

$$\|\xi_k^s\| \leq c = 2^l \quad \text{a.c.} \quad 1 \in Z, \quad k = 1, \dots, n, \tag{2}$$

$$M_s \xi^s = \hat{f}(x^s), \tag{3}$$

where $\hat{f}(x^s) \in \partial f(x^s), \xi^s = \gamma^s - \hat{f}(x^s), \tag{4}$

where $\gamma_k^s = c \text{sign}(\xi_k^s) u_+(\|\xi_k^s\| - \alpha^s), k = 1, \dots, n, \tag{5}$

$$\alpha^s \in U[0, c], \delta > 0. \tag{6}$$

That with probability 1 all limiting points of sequence $\{x^s\}$ (set by parities):

$$x^{s+1} = \pi_x(x^s - 2^{ent(r_s)} \gamma^s) \quad s = 0, 1, \dots \quad s = 0, 1, \dots, \tag{7}$$

where $r_{s+1} = \min\{q_0, r_s - \langle \gamma^{s+1}, \Delta x^{s+1} \rangle - \delta 2^{ent(r_s)}\}, \tag{8}$

$$q_0 > 0, r_0 = 0, \Delta x^{s+1} = x^{s+1} - x^s. \tag{9}$$

Belong to set

$$X^* = \{x^* \in X : f(x^*) = \min_{y \in X} f(y)\}.$$

For the theorem proof it is necessary to prove some lemmas. It is necessary to notice, that from (5) follows, that

$$\|\gamma^s\| \leq c\sqrt{n} = c_2 \quad \text{a.c.} \tag{10}$$

Let's designate $\rho_s = 2^{ent(r_s)}$.

Lemma 1. The parity $\sum_{s=0}^{\infty} 2^{ent(r_s)} = \infty$ a.c is carried out.

The proof. We will assume opposite, i.e. there is a constant k , for which probability of event: $A = \{\omega : \sum_{s=0}^{\infty} 2^{ent(r_s)} \leq k\}$ it is more 0, i.e. $P(A) > 0$. From (7, 8, 9, 10) it is had (on Schwarz's inequality [5] and to properties of the operator of designing π_x [6]):

$$\begin{aligned} r_{s+1} &\geq \min(q_0, r_s - \|\gamma^{s+1}\| \cdot \|\Delta x^{s+1}\| - \delta 2^{ent(r_s)}) \geq \\ &\geq \min(q_0, r_s - c_2^2 2^{ent(r_s)} - \delta 2^{ent(r_s)}) \geq \min(q_0, r_s - c_3 2^{ent(r_s)}) \\ &\min(q_0, r_s - c_3 2^{ent(r_s)}) \text{ a.c.,} \end{aligned}$$

where $c_3 = (c_2^2 + \delta) > 0$. Then for elementary events $\omega \in A$ it is had (since $r_0 = 0$) that

$$r_{s+1} \geq \min(q_0, -c_3 \sum_{i=0}^s 2^{ent(r_i)}) \geq \min(q_0, -c_3 k) \tag{11}$$

Thus we will receive that $2^{r_{s+1}} \geq \min(2^{q_0}, 2^{-c_3 k}) > 0$
 $2^{r_{s+1}} = 2^{ent(r_{s+1}) + \Delta_{s+1}}, \quad \text{where} \quad -1 < \Delta_{s+1} < 1.$ Hence
 $2^{ent(r_{s+1})} \geq 2^{-\Delta_{s+1}} \min(2^{q_0}, 2^{-c_3 k}) \geq 0.5 \min(2^{q_0}, 2^{-c_3 k}) > 0$

that contradicts a parity $\sum_{s=0}^{\infty} 2^{ent(r_s)} \leq k$ about convergence of a number since the general member of a number does not aspire to 0.

Lemma 2. The parity $\sum_{s=0}^{\infty} M 2^{ent(r_s)} \leq \infty$ a.c is carried out.

The proof. We will show, that at the fixed value s value of a random variable $y_{s+1} = r_{s+1} + f(x^{s+1})$ is limited on X. On (1) and to condition Lipschitz's [7] exist c_4 also c_5 such, that $c_4 \leq f(x^{s+1}) \leq c_5$ for $\forall x \in X$. From (8) follows, that

$$r_{s+1} \leq q_0. \text{ From (11) } \min(q_0, -c_3 \sum_{i=0}^s \rho_i) \leq r_{s+1}, \text{ as proves}$$

this statement. Hence, exists $M r_{s+1}$, on property of integral Stieltjes's for function of the limited variation [8, 9]. From (4), (8), considering definition of a gradient of convex function [10] and properties of operation of designing [6] we will receive

$$\begin{aligned} r_{s+1} &\leq r_s - \langle \gamma^{s+1}, \Delta x^{s+1} \rangle - \delta \rho_s \leq r_s + \\ &+ f(x^s) - f(x^{s+1}) - \langle \zeta^{s+1}, \Delta x^{s+1} \rangle - \delta \rho_s. \end{aligned}$$

From (2.3), (2.4), (2.7) will follow, that $M_{s+1} \langle \zeta^{s+1}, \Delta x^{s+1} \rangle = M_{s+1} \langle (\gamma^{s+1} - \hat{f}(x^{s+1})), \pi_x(x^s - \rho_s \gamma^s) - x^s \rangle = 0$,

since γ^{s+1} SQG. Hence, using properties of a conditional population mean [11], we will receive

$$M_{s+1} y_{s+1} \leq y_s - \delta \rho_s. \tag{12}$$

The size $2^{r_{s+1}} / 2^{Mr_{s+1}}$ is limited for $\forall s$. In case of final r_{s+1} this statement is obvious. On (8) $r_{s+1} < q_0$, thus there was a case, when $r_{s+1} \rightarrow -\infty$ at $s \rightarrow \infty$. At $r_{s+1} \rightarrow -\infty$ for enough big S it is had: $r_{s+1} = r_s - \langle \gamma^{s+1}, \Delta x^{s+1} \rangle - \delta \rho_s$, where $\rho_s = 2^{ent(r_s)} \rightarrow 0$ at $r_{s+1} \rightarrow -\infty$. From (1, 7, 8, 9, 10), using Schwarz's inequality and properties of the operator of designing π_x we will receive, that $r_s - \|\gamma^{s+1}\| \cdot \|\Delta x^{s+1}\| - \delta \rho_s \leq r_{s+1} \leq r_s + \|\gamma^{s+1}\| \cdot \|\Delta x^{s+1}\| - \delta \rho_s$ for $r_s - c_2 \rho_s - \delta \rho_s \leq r_{s+1} \leq r_s + c_2 \rho_s - \delta \rho_s$ and $r_s - c_3 \rho_s \leq r_{s+1} \leq r_s + c_3 \rho_s$, where $c_3 > 0$. We will designate $z_s = r_s - c_3 \rho_s$ and $t_s = r_s + c_3 \rho_s$.

Then $z_s - Mr_{s+1} \leq r_{s+1} - Mr_{s+1} \leq t_s - Mr_{s+1}$ a.c.

$Mr_{s+1} = \int_{z_s}^{t_s} z dF_{s+1}(z)$, where $F_{s+1}(z)$ — function of distribution of a random variable r_{s+1} . Using the integration formula in parts for integral and under the theorem of an average, we have

$$Mr_{s+1} = z F_{s+1}(z) \Big|_{z_s}^{t_s} - \int_{z_s}^{t_s} F_{s+1}(z) dz = t_s - (t_s - z_s) \mu,$$

where $0 \leq \mu \leq 1$.

Thus:

$$-(t_s - z_s)(1 - \mu) \leq r_{s+1} - Mr_{s+1} \leq (t_s - z_s) \mu,$$

$$t_s - z_s = r_s + c_3 \rho_s - r_s + c_3 \rho_s = 2c_3 \rho_s$$

and since have assumed, that $\rho_s \rightarrow 0$ at $s \rightarrow \infty$ under the known theorem from the analysis we will receive

$$\lim_{s \rightarrow \infty} (r_{s+1} - Mr_{s+1}) = 0 \text{ and therefore } \lim_{s \rightarrow \infty} (2^{r_{s+1}} / 2^{Mr_{s+1}}) = 1$$

i.e. the size $2^{r_{s+1} - Mr_{s+1}}$ — is limited for $\forall x$ is had

$$\varepsilon > 0 : \frac{2^{r_s}}{2^{Mr_s} \varepsilon} \leq 1. \text{ As } 2^{r_s} = 2^{ent(r_s) + \Delta_s}, \text{ where } -1 < \Delta_s < 1$$

we will receive, that

$$1 \geq \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\rho_s 2^{\Delta_s}}{2^{Mr_s}} \geq \frac{0.5 \rho_s}{\varepsilon 2^{Mr_s}}. \tag{13}$$

From (12, 13) it is had, since $\delta > 0$:

$$M_{s+1} y_{s+1} \leq y_s - \frac{0.5 \delta}{\varepsilon} \cdot \frac{\rho_s^2}{2^{Mr_s}} \text{ a.c.} \tag{14}$$

We take a population mean from both parts of an inequality and it is received $My_{s+1} \leq My_s - \frac{0.5 \delta M \rho_s^2}{\varepsilon 2^{Mr_s}}$. Passing to exponential to the record form it is received

$$2^{My_{s+1}} \leq 2^{My_s} \cdot 2^{-\frac{0.5 \delta M \rho_s^2}{\varepsilon 2^{Mr_s}}}. \tag{15}$$

Let $z = \frac{0.5 \delta M \rho_s^2}{\varepsilon 2^{Mr_s}}$, obviously $z > 0$. As from (8)

$\rho_s = 2^{ent(r_s)} \leq 2^{ent(q_0)} = \bar{\rho}$ and considering (13) we will receive $0 \leq z \leq \delta \bar{\rho}$. Owing to camber of function 2^{-z} it is

had, that for $\beta = \frac{1 - 2^{-\delta \bar{\rho}}}{\delta \bar{\rho}}$ the inequality is carried out

$1 - \beta z \geq 2^{-z}$. In this case from a parity (15) we will receive, that

$$2^{My_{s+1}} \leq 2^{My_s} (1 - \beta \cdot \frac{0.5 \delta M \rho_s^2}{\varepsilon 2^{Mr_s}}) = 2^{My_s} - \frac{\beta 0.5 \delta c_6 M \rho_s^2}{\varepsilon}, \tag{16}$$

where $c_6 = \inf_{x \in X} 2^{f(x)}$, and $y_s = r_s + f(x^s)$.

Summarising an inequality (16) at $i = 0, \dots, s$, we have, that

$$2^{My_{s+1}} \leq 2^{My_0} - \frac{0.5 \beta \delta c_6}{\varepsilon} \sum_{i=0}^s M \rho_i^2,$$

$$0 \leq 2^{My_{s+1}} = 2^{Mr_{s+1} + Mf(x^{s+1})},$$

but also $r_{s+1} \leq q_0$ $c_4 \leq f(x) \leq c_5$ i.e. $2^{My_{s+1}}$ it is limited.

A constant $\frac{0.5 \beta \delta c_6}{\varepsilon} > 0$ also we will definitively receive,

that $c_0 \sum_{i=0}^s M \rho_i^2 \leq 2^{My_0} - 2^{My_{s+1}} < +\infty$, as proves a lemma

2.

Consequence. It is carried out $\rho_s \rightarrow 0$ and $r_s \rightarrow -\infty$ at $s \rightarrow \infty$ a.c.

Lemma 3. It is carried out $\lim_{s \rightarrow \infty} (\rho_{s-1} / \rho_s) = 1$ a.c.

The proof. From (8) follows (since $r_s \rightarrow -\infty$ a.c.), that almost for each elementary event $\omega \in \Omega$ there will be such number $S(\omega)$, that at $s > S(\omega)$ is had

$$r_{s+1} = r_s + \Delta r_s = r_s - \langle \gamma^{s+1}, \Delta x^{s+1} \rangle - \delta \rho_s. \tag{17}$$

From (7) it is had, that

$$\Delta x^{s+1} = x^{s+1} - x^s = \pi_x(x^s - \rho_s \gamma^s) - x^s.$$

Using Schwarz's inequality and properties of the operator of designing on convex set X , we will receive

$$|\Delta r_s| = \left| -\langle \gamma^{s+1}, \Delta x^{s+1} \rangle - \delta \rho_s \right| \leq \|\gamma^{s+1}\| \cdot \|\pi_x(x^s - \rho_s \gamma^s) - x^s\| + \delta \rho_s \leq c_2^2 \rho_s + \delta \rho_s = c_3 \rho_s,$$

where $c_3 > 0$. (18)

As $\rho_s \rightarrow 0$ at $s \rightarrow \infty$ for enough big s will be $|\Delta r_s| \ll 1$, i.e. $r_s \in R$.

$$\frac{\rho_{s-1}}{\rho_s} = 2^{ent(r_{s-1}) - ent(r_{s-1} + \Delta r_{s-1})}$$

Function $ent(r)$ — not decreasing and continuous in points $r \notin Z$, therefore

$$2^{ent(r_{s-1}) - ent(r_{s-1} + c_3 \rho_{s-1})} \leq \frac{\rho_{s-1}}{\rho_s} \leq 2^{ent(r_{s-1}) - ent(r_{s-1} - c_3)}$$

From a lemma 2 follows, that $\rho_{s-1} \rightarrow 0$ at $s \rightarrow \infty$ and passing to a limit we will receive

$$1 \leq \lim_{s \rightarrow \infty} (\rho_{s-1} / \rho_s) \leq 1 \text{ at } r \notin Z. \quad (19)$$

As $r_s = r_{s-1} + \Delta r_{s-1}$ and from (18) follows, that $\Delta r_{s-1} \rightarrow 0$, and from a lemma 2 $r_{s-1} \rightarrow -\infty$ at $r_{s-1} \in R$ $s \rightarrow \infty$ also the set $Z \subset R$ will be set of a measure zero, therefore we will receive $\lim_{s \rightarrow \infty} (\rho_{s-1} / \rho_s) = 1$ a.c.

The algorithm is understood as a rule of construction of sequence of the points $\{x^s\}$ belonging to some set $X \subseteq R^n$. It is considered set some set of decisions $X^* \subset X$. The algorithm is called as converging if it is carried out

$$\lim_{s \rightarrow \infty} d(x^s, X^*) = 0, \text{ where } d(x^s, X^*) = \inf_{x \in X^*} \|x^s - x\|.$$

The theorem 3 [1]. Let following conditions are satisfied:

- A1. There is a compact set X such, that with probability 1 $\{x^s(\omega)\} \subset X$;
- A2. $\exists w : X \rightarrow R$ — Continuous function;
- A3. If there is such event $B \subset \Omega$, as $P(B) > 0$ for all $\omega \in B$ there is a subsequence $\{x^{l_k(\omega)}(\omega)\}$ converging to a point $x'(\omega)$ such, that $d(x'(\omega), X^*) > 0$ for any $\varepsilon > 0$ there is a subsequence of indexes $\{v_k(\omega)\}$ such, that $x^\tau \subset U_\varepsilon(x'(\omega))$ for $l_k(\omega) \leq \tau \leq v_k(\omega)$ and $\lim_{k \rightarrow \infty} w(x^{v_k(\omega)}(\omega)) < w(x'(\omega))$;
- A4. Function w accepts on set X^* no more than countably number of values;
- A5. $\|x^s(\omega) - x^{s+1}(\omega)\| \rightarrow 0$ a.c. At $s \rightarrow \infty$.

If conditions A1-A5, $d(x^s(\omega), X^*) \rightarrow 0$ a.c are satisfied.

The proof of the theorem 2 is based on the lemmas 1 proved above, 2, 3 and the theorem 3. This proof practically does not differ from the proof of the theorem 1 [1].

AN ESTIMATION OF SPEED OF CONVERGENCE OF COMPUTING PROCESS

For an estimation of speed of convergence it is necessary to study asymptotic properties of sequence of steps of multipliers $\rho_s = 2^{ent(r_s)}$ from the theorem 2.

Lemma 4. For sequence $\{x^s\}$ all conditions of the theorem 2 are satisfied and function $f(x)$ is twice continuously differentiated on the open set, containing X , then

$$\rho_s = 2^{ent(r_s)} = \frac{a_s}{(1+s)\delta \ln 2} + o(1/(1+s)) \text{ a.c.,}$$

where $o(1/(1+s))$ — size infinitesimal in comparison with $a_s \in (0, 5; 2)$ $1/(1+s)$ $a_s \in (0, 5; 2)$ $a_s \in (0, 5; 2)$.

The proof. From a parity (8) and considering, that $r_s \rightarrow -\infty$ for enough big s is had $\rho_s = 2^{ent(r_s)} = 2^{r_s - \Delta_s}$

$$-1 \leq \Delta_s \leq 0 \quad 2^{r_s} = 2^{ent(r_s) + \Delta_s} = 2^{ent(r_{s-1}) + \Delta_{s-1} - \langle \gamma^s, \Delta x^s \rangle - \delta \rho_{s-1}}$$

Hence, we will receive, that $\rho_s = \rho_{s-1} 2^{\Delta_{s-1} - \Delta_s} \cdot 2^{-\langle \gamma^s, \Delta x^s \rangle - \delta \rho_{s-1}}$.

$$\text{Let's designate } \sigma_s = 2^{r_s} = 2^{r_{s-1}} \cdot 2^{-\langle \gamma^s, \Delta x^s \rangle - \delta 2^{r_{s-1}} \cdot 2^{-\Delta_{s-1}}}$$

Let's enter size $\tau_s = \log_2[(1+s)\sigma_s]$, then

$$\tau_s = \tau_{s-1} + \frac{2^{-\Delta_{s-1}}}{s \ln 2} (2^{\Delta_{s-1}} - \delta \ln 2 \cdot 2^{\tau_{s-1}}) + \log_2(1+s) - 1/(s \ln 2) - \langle \gamma^s, \Delta x^s \rangle - \log_2 s,$$

$$\text{as: } \tau_{s-1} = \log_2(s\sigma_{s-1}) \quad \log_2 \sigma_{s-1} = \tau_{s-1} - \log_2 s$$

$$2^{\tau_{s-1}} = s\sigma_{s-1} \quad \sigma_{s-1} = 2^{\tau_{s-1}} / s.$$

Considering, that $f(x)$ twice differentiated function, we have from (2.4): $\gamma^s = \zeta^s + \nabla f(x^s)$ and then we will receive

$$\tau_s = \tau_{s-1} + \frac{2^{-\Delta_{s-1}}}{s \ln 2} (2^{\Delta_{s-1}} - M 2^{\Delta_{s-1}} + M 2^{\Delta_{s-1}} - \delta \ln 2 \cdot 2^{\tau_{s-1}}) + \log_2(1+1/s) - 1/(s \ln 2) - \langle \zeta^s, \Delta x^s \rangle - \langle \nabla f(x^s), \Delta x^s \rangle.$$

A number $\sum_{s=1}^{\infty} [\log_2(1+1/s) - 1/(s \ln 2)]$ converges.

From a lemma 2, the theorem of the Dub [11], considering, that $\Delta x^s = x^s - x^{s-1} = \pi_x(x^{s-1} - \rho_{s-1} \gamma^{s-1}) - x^{s-1}$,

convergence martingale of some $\sum_{s=1}^{\infty} \langle \zeta^s, \Delta x^s \rangle$ a.c. follows.

Function $f(x)$ is twice continuously differentiated, therefore $\langle \nabla f(x^s), \Delta x^s \rangle = f(x^s) - f(x^{s-1}) + \Psi_s \|\Delta x^s\|^2$, where Ψ_s is in regular intervals limited for all s .

Thus, putting term by term last equality m of times, we will receive:

$$\sum_{s=1}^m \langle \nabla f(x^s), \Delta x^s \rangle = f(x^m) - f(x^0) + \sum_{s=1}^m \psi_s \|\Delta x^s\|^2.$$

As it has been shown at the proof of the theorem 2 function $f(x)$ it is limited on compact set X , and a number

$$\sum_{s=1}^m \psi_s \|\Delta x^s\|^2$$

is converging a.c. Owing to a lemma 2 and

consequently a number $\sum_{s=1}^{\infty} \langle \nabla f(x^s), \Delta x^s \rangle$ converges a.c.

Expression for τ_s in this case looks like:

$$\tau_s = \tau_{s-1} + \frac{2^{-\Delta_{s-1}}}{s \ln 2} \cdot [(2^{\Delta_{s-1}} - M 2^{\Delta_{s-1}}) + M 2^{\Delta_{s-1}} - \delta \ln 2 \cdot 2^{\tau_{s-1}}] + t_s,$$

where a number $\sum_{s=1}^{\infty} t_s$ is converging a.c. $2^{-\Delta_{s-1}} \in [1; 2]$,

$M 2^{\Delta_{s-1}} \in [0.5; 1]$ and thus the formula for τ_s coincides with Robbins-Monroe algorithm for the equation decision $b - \delta \ln 2 \cdot 2^z = 0$, where $b = M 2^{\Delta_{s-1}}$.

By results about convergence of algorithms of stochastic approximation [12] it is had $\tau_s \rightarrow \log_2[b / (\delta \ln 2)]$ at $s \rightarrow \infty$ a.c. From here we receive, that $(1+s)\sigma_s \rightarrow b / (\delta \ln 2)$ at $s \rightarrow \infty$ a.c. And, hence

$$\sigma_s = 2^{\tau_s} = \rho_s 2^{\Delta_s} = \frac{b}{(1+s)\delta \ln 2} + o\left(\frac{1}{1+s}\right) \text{ a.c. Thus we}$$

$$\text{have: } a_s = b \cdot 2^{-\Delta_s} \text{ and } \rho_s = \frac{a_s}{(1+s)\delta \ln 2} + o\left(\frac{1}{1+s}\right)$$

a.c., where $a_s \in (0, 5; 2)$.

At an estimation of speed of convergence of recurrent stochastic algorithms, as criterion, usually, accept value $M \|x^2 - x^*\|^2$, where x^* – a point of a minimum of function $f(x)$ on set X [10].

The theorem 4. For sequence $\{x^s\}$ all conditions of the theorem 2 are satisfied, function $f(x)$ is twice continuously differentiated on the open set, containing X

$$M \|\gamma^s\|^2 \leq \sigma_0^2 \quad s = 0, 1, \dots \quad f(x) \geq f(x^*) + B \|x^* - x\|^2,$$

where 0 and x^* a minimum point $f(x)$ on X then at $\delta_0 = B / (1, 25 \ln 2)$ it is had

$$M \|x^* - x^{s+1}\|^2 \leq \frac{1, 56 \sigma_0^2}{B^2 (1+s)} + o\left[\frac{1}{1+s}\right] \text{ a.c.}$$

The proof. We will enter kind function $w(x^s) = \|x^* - x^s\|^2$. From conditions of the theorem 2.1

$$\zeta^s = \gamma^s - \hat{f}(x^s). \text{ As follows from (18)}$$

$$g_{s-1} = 2^{ent(r_{s-1} - c_3 \rho_{s-1})} \leq \rho_s = 2^{ent(r_{s-1} - \langle \gamma^s, \Delta x^s \rangle - \delta \rho_s)} \leq 2^{ent(r_{s-1} + c_3 \rho_{s-1})} = h_{s-1}. \quad (20)$$

From a lemma 2.4 it is had, that

$$\rho_s = \frac{a_s}{(1+s)\delta \ln 2} + o(1/(1+s)) \text{ a.c.,}$$

where $a_s \in (0.5; 2)$. Hence, from some number s also $\varepsilon > 0$ it is had:

$$t_s = \frac{a_s - \varepsilon}{(1+s)\delta \ln 2} < \rho_s < \frac{a_s + \varepsilon}{(1+s)\delta \ln 2} = l_s. \quad (21)$$

Further, we use Schwarz's inequality and property of the operator of designing on convex set [5, 6], definition SQG and we will receive:

$$w(x^{s+1}) = \|x^* - x^{s+1}\|^2 \leq \|x^* - x^s + \rho_s \gamma^s\|^2 \\ w(x^{s+1}) \leq w(x^s) + 2\rho_s \langle \gamma^s, x^* - x^s \rangle + \rho_s^2 \|\gamma^s\|^2 \leq w(x^s) + 2\rho_s (f^* - f(x^s)) + 2\rho_s \langle \zeta^s, x^* - x^s \rangle - 2g_{s-1} \langle \zeta^s, x^* - x^s \rangle + 2g_{s-1} \langle \zeta^s, x^* - x^s \rangle + \rho_s^2 \|\gamma^s\|^2,$$

where $f^* = f(x^*)$ properties of a gradient twice continuously differentiated function, since are used $\gamma^s = \hat{f}(x^s) + \zeta^s$.

Thus, using parities (20, 21), we will receive:

$$w(x^{s+1}) \leq w(x^s) + 2\rho_s (f^* - f(x^s)) + 2(\rho_s - g_{s-1}) \|\zeta^s\| \cdot \|x^* - x^s\| + 2g_{s-1} \langle \zeta^s, x^* - x^s \rangle + \rho_s^2 \|\gamma^s\|^2 \leq w(x^s) + 2t_s (f^* - f(x^s)) + 2(h_{s-1} - g_{s-1}) \|\zeta^s\| \|x^* - x^s\| + 2g_{s-1} \langle \zeta^s, x^* - x^s \rangle + l_s^2 \|\gamma^s\|^2. \quad (22)$$

Let's consider the composed

$$2(h_{s-1} - g_{s-1}) \|\zeta^s\| \cdot \|x^* - x^s\| = 2(2^{ent(r_{s-1} + c_3 \rho_{s-1})} - 2^{ent(r_{s-1} - c_3 \rho_{s-1})}) \cdot \|\zeta^s\| \cdot \|x^* - x^s\|$$

$\|\zeta^s\|$ it is limited, $\|x^* - x^s\| \rightarrow 0$ under the theorem 2.1, $\rho_{s-1} \rightarrow 0$ and $r_{s-1} \rightarrow -\infty$ a.c. On a consequence from a lemma 2. At big enough S the length of an interval $[r_{s-1} - c_3 \rho_{s-1}, r_{s-1} + c_3 \rho_{s-1}]$ will be $\ll 1$ and then the number can get to this interval no more than a single whole.

Considering properties of function ent we will have, that

$$(h_{s-1} - g_{s-1}) \leq (2^{ent(r_{s-1} + c_3 \rho_{s-1})} - 2^{ent(r_{s-1} - c_3 \rho_{s-1})} - 1) 2^{ent(r_{s-1} - c_3 \rho_{s-1})} \leq 2^{ent(r_{s-1} - c_3 \rho_{s-1})} \rightarrow 0,$$

since $r_{s-1} \rightarrow -\infty$ a.c. Function $ent(y) = \text{const}$ in those intervals, where $y \notin Z$ and consequently at $s \rightarrow \infty$ $(h_{s-1} - g_{s-1}) = 0$ a.c. Except for set of a measure zero $(Z \subset R)$.

Thus we receive, that

$$w(x^{s+1}) \leq w(x^s) + 2t_s(f^* - f(x^s)) + 2g_{s-1} \langle \zeta^s, x^* - x^s \rangle + l_s^2 \|\gamma^s\|^2 \quad \text{a.c.}$$

On a theorem condition it is had

$$f(x) \geq f(x^*) + B \|x^* - x\|^2 \quad \text{and on (10) we will receive}$$

$$w(x^{s+1}) \leq w(x^s) - \frac{2(a_s - \varepsilon)B}{(1+s)\delta \ln 2} w(x^s) + \frac{(a_s + \varepsilon)^2}{(1+s)^2 \delta^2 \ln^2 2} \|\gamma^s\|^2 + 2g_{s-1} \langle \zeta^s, x^* - x^s \rangle. \quad (23)$$

The size $\varepsilon > 0$ can be any way small, therefore, considering a part of an inequality (23) convex function from $a_s \in [0.5; 2]$ it reaches the maximum at $a_s = 0.5$ or $a_s = 2$.

Let's enter designations: $k = 1 + s$, $C_k = \frac{B}{\delta \ln 2}$ and

$$d_k = \frac{0.25 \|\gamma^k\|^2}{\delta^2 \ln^2 2} \quad \text{at } a_s = 0.5 \quad \text{and } C_k = \frac{4B}{\delta \ln 2},$$

$$d_k = \frac{4 \|\gamma^k\|^2}{\delta^2 \ln^2 2} \quad \text{at } a_s = 2 \quad w(x^{s+1}) = u_{k+1}$$

$$G_k = 2g_{s-1} \langle \zeta^s, x^* - x^s \rangle.$$

Values C_k also d_k get out under a condition $\max(\frac{C_k}{k} u_k + \frac{d_k}{k^2})$. From (23) we will receive, that

$$u_{k+1} \leq u_k - \frac{C_k}{k} u_k + \frac{d_k}{k^2} + G_k. \quad \text{We take } \delta = \frac{B}{1.25 \ln 2} \quad \text{and}$$

$$v_k = k u_k - \frac{(1.25)^2 \|\gamma^k\|^2}{B^2}.$$

Then we have

$$v_{k+1} = (k+1)u_{k+1} - \frac{(1.25)^2 \|\gamma^k\|^2}{B^2} \leq (k(1+1/k)((1-C_k/k)u_k +$$

$$+G_k + \frac{d_k}{k^2}) - \frac{(1.25)^2 \|\gamma^k\|^2}{B^2} = k u_k (1 - (C_k - 1)/k - C_k/k^2) +$$

$$+d_k(1+1/k)/k + k(1+1/k)G_k - \frac{(1.25)^2 \|\gamma^k\|^2}{B^2} =$$

$$= (v_k + \frac{(1.25)^2 \|\gamma^k\|^2}{B^2})(1 - (C_k - 1)/k - C_k/k^2) + d_k/k^2 + d_k/k - \frac{(1.25)^2 \|\gamma^k\|^2}{B^2} + k(1+1/k)G_k = v_k(1 - (C_k - 1)/k - C_k/k^2) - \frac{(1.25)^2 \|\gamma^k\|^2 (C_k - 1)}{B^2 k} + d_k/k - \frac{C_k(1.25)^2 \|\gamma^k\|^2}{k^2 B^2} + d_k/k^2 + k(1+1/k)G_k. \quad (24)$$

Let's consider the composed:

$$\frac{d_k}{k} - \frac{(1.25)^2 \|\gamma^k\|^2 (C_k - 1)}{B^2 k}. \quad (25)$$

At $a_s = 0.5$ $C_k = \frac{B}{\delta \ln 2} = \frac{B}{1.25 \ln 2} = 1.25$ and

$$d_k = \frac{0.25 \|\gamma^k\|^2}{\delta^2 \ln^2 2} = \frac{0.25 \|\gamma^k\|^2}{\frac{B^2 \ln^2 2}{1.25^2 \ln^2 2}} = \frac{0.25(1.25)^2 \|\gamma^k\|^2}{B^2}.$$

And then value (25) will be equal:

$$\frac{0.25(1.25)^2 \|\gamma^k\|^2}{B^2 k} - \frac{0.25(1.25)^2 \|\gamma^k\|^2}{B^2 k} = 0.$$

Similarly at $a_s = 2$: $C_k = \frac{4B}{\delta \ln 2} = \frac{4B}{1.25 \ln 2} = 1.25 \cdot 4$,

$$d_k = \frac{4 \|\gamma^k\|^2}{\delta^2 \ln^2 2} = \frac{4 \|\gamma^k\|^2}{\frac{B^2 \ln^2 2}{1.25^2 \ln^2 2}} = \frac{4(1.25)^2 \|\gamma^k\|^2}{B^2}.$$

And then value of expression (25) will be equal

$$\frac{4(1.25)^2 \|\gamma^k\|^2}{B^2 k} - \frac{4(1.25)^2 \|\gamma^k\|^2}{B^2 k} = 0.$$

Therefore from (24) we receive a parity:

$$v_{k+1} \leq v_k (1 - \frac{C_k - 1}{k} - \frac{C_k}{k^2}) + \frac{d_k - (1.25)^2 C_k \|\gamma^k\|^2}{k^2} + k(1 + \frac{1}{k})G_k \leq v_k (1 - \frac{\min C_k - 1}{k} - \frac{\min C_k}{k^2}) + \frac{\max d_k}{k^2} + k(1 + \frac{1}{k})G_k. \quad (26)$$

Considering, as

$\min C_k = 1.25 > 1, G_k = 2g_{s-1} \langle \xi^s, x^* - x^s \rangle$ and since

$x^s = \pi_x(x^{s-1} - \rho_{s-1}\gamma^{s-1}), M_s \zeta^s = 0$ by definition SQG taking at first conditional, and then an unconditional population mean from (26) we will receive

$$Mv_{k+1} \leq Mv_k \left(1 - \frac{0.25}{k} - \frac{1.25}{k^2}\right) + \frac{4(1.25)^2}{B^2 k^2} M \|\gamma^k\|^2 \leq$$

On

$$\leq Mv_k (1 - 0.25/k) + \frac{4(1.25)^2 \sigma_o^2}{B^2 k^2}.$$

a lemma about recurrent sequences [10] we will receive $\lim_{k \rightarrow \infty} Mv_k \leq 0$. Thus, considering definition v_k , we have

$$Mu_{k+1} \leq \frac{(1.25)^2 \sigma_o^2}{kB^2} + o\left(\frac{1}{k}\right) = \frac{1.56\sigma_o^2}{(1+s)B^2} + o\left(\frac{1}{1+s}\right),$$

as proves the theorem.

Consequence from the theorem 4 from (10) it is had:

$$M \|x^* - x^{s+1}\|^2 \leq \frac{1,56nc^2}{(1+s)}.$$

If the function minimum $f(x)$ is in set X or if the problem of unconditional optimisation $\nabla f(x^*) = 0$ and then, at $s \rightarrow \infty$ it is had $\|\nabla f(x^s)\| \rightarrow 0$ a.c. dares., i.e. for enough big s will be $\|\nabla f(x^s)\| < \varepsilon_1$, where $\varepsilon_1 > 0$ small positive number. At research of questions of stochastic optimisation restriction σ^2 on a dispersion of components SQG [10] in the form of a parity $M(\xi_k^s - \hat{f}_k(x^s)) < \sigma^2$ $k = \overline{1, n}$, $s = 0, 1, \dots$ where n – regularity of space, as a rule, is set. $\hat{f}_k(x^s) = \nabla f_k(x^s)$ And in a vicinity of a stationary point value $\nabla f_k(x^s)$ is not enough for differentiated function. Therefore, at asymptotic estimations it is possible to put, that $M[(\xi_k^s)^2] < \sigma^2$ since some s . From (5) it is had

$$(\gamma_k^s)^2 = c^2 u_+ \left(\left| \xi_k^s \right| - \alpha^s \right), k = \overline{1, n}.$$

Further, we take a population mean and we will receive $M[(\gamma_k^s)^2] = cM \left| \xi_k^s \right| = 2^l M \left| \xi_k^s \right|$. Using inequality Jensen [11] we will receive

$$\sigma^2 > M[(\xi_k^s)^2] \geq [M \left| \xi_k^s \right|]^2 = \left\{ \frac{M[(\gamma_k^s)^2]}{c} \right\}^2.$$

Hence $c\sigma > M[(\gamma_k^s)^2]$.

By norm definition it is had and received

$$M \|\gamma^s\|^2 = \sum_{k=1}^n M(\gamma_k^s)^2, \text{ that } nc\sigma > M \|\gamma^s\|^2 \text{ we will put}$$

$$\sigma_o^2 = nc\sigma. \tag{27}$$

On a condition of the theorem 2.1. $\left| \xi_k^s \right| < c$ a.c. $k = \overline{1, n}$ $s = 0, 1, \dots$, having taken advantage of a rule of three sigma it is possible to consider, as $c = 3\sigma$ then

$$\sigma_o^2 = 3n\sigma^2. \tag{28}$$

Having spent similar calculations for a method under the theorem 1, considering, that instead of γ^s there is used SQG $a_s = 1 \xi^s$ and since $n\sigma^2 > M \|\xi^s\|^2$ we will receive, that

$$M \|x^* - x^{s+1}\|^2 \leq \frac{n\sigma^2}{\delta^2 \ln^2 2(2B / (\delta \ln 2) - 1)(1+s)} + o[1 / (1+s)].$$

From the theorem 2.

$$\delta = B / (1,25 \ln 2). \tag{29}$$

And then for an initial method — of analogue will be:

$$M \|x^* - x^{s+1}\|^2 \leq \frac{n\sigma^2}{B^2(1+s)} + o\left[\frac{1}{1+s}\right].$$

For an investigated method under the theorem 2 we will receive an estimation:

$$M \|x^* - x^{s+1}\|^2 \leq \frac{4,7n\sigma^2}{B^2(1+s)} + o\left[\frac{1}{1+s}\right] =$$

$$= \frac{1,56nc\sigma}{B^2(1+s)} + o\left[\frac{1}{1+s}\right]. \tag{30}$$

Thus, roughly, it is possible to compare an investigated method and a method-analogue by quantity of steps of iteration.

Let S – number of iteration for the modernised algorithm, and N – number of iterations for the initial algorithm, necessary for achievement of the set accuracy of calculations then we will receive

$$\frac{S}{N} \cong \frac{1,56c}{\sigma}. \tag{31}$$

Or, at parity performance

$$c = 3\sigma, \text{ will be: } \frac{S}{N} = 4,7 \cong 5.$$

THE CONCLUSION

Though application of the modified algorithm considerably reduces time of performance of one iteration, but increases total of iterations. Despite it it provides the general gain in time at work. The given algorithm can be used for the decision of problems of the stochastic optimisation often meeting in practice. For example, the stochastic problem of distribution of resources, optimisation of parametres of technological processes, the decision of problems of identification, processing of signals in the conditions of hindrances etc. the Interesting appendix of the given algorithm is its use for the primary goal decision stenographic, namely installations of the fact of the latent information transfer in multimedia data.

REFERENCES

1. Uryasev S.P. Adaptive algorithms of stochastic optimization and the theory of games [*Adaptivnye algoritmy stokhasticheskoy optimizatsii i teorii igr*]. – Moscow : The Science, 1990. – 184 p.

2. Robbins H., Monro S. A stochastic approximation method // *Ann. Math. Statistics*, 1951, vol. 22. – Pp. 400–407.

3. Kiefer J., Wolfowitz J. Stochastic estimation of the maximum of a regression function // *Ann. Math. Statistics*, 1952, vol. 23. – Pp. 462–466.

4. Fedorov R. F, Jakovlev V.V., Dobris G.V. Stochastic information converters [*Stokhasticheskie preobrazovateli informatsii*]. Lenigrad : Mechanical engineering, 1978. – 303 p.

5. Kantorovich A.V., Akilov G.P. The Functional analysis [*Funktsional'nyy analiz*]. – Moscow : The Science, 1977. – 741 p.

6. Karmanov V.G. Mathematical programming [*Matematicheskoe programmirovaniye*]. – Moscow : The Science, 1986. – 286 p.

7. Ermakov S.M., Zhiglyavsky A.A. The Mathematical theory of optimum experiment [*Matematicheskaya teoriya optimal'nogo eksperimenta*]. – Moscow : The Science, 1987, 318 p.

8. Borovkov A.A. Probability theory [*Teoriya veroyatnostey*]. – Moscow : The Science, 1986. – 432 p.

9. Gnedenko B.V. A probability theory Course [*Kurs teorii veroyatnostey*]. – Moscow : Fizmatgiz, 1961 – 406 p.

10. Poliak B.T. Introduction in optimization [*Vvedenie v optimizatsiyu*]. – Moscow : The Science, 1983. – 384 p.

11. Shiryaev A.N. Probability [*Veroyatnost'*]. – Moscow : The Science, 1980. – 575 p.

12. Nevelson M.B. Stochastic approximation and recurrent evaluation [*Stokhasticheskaya approksimatsiya i rekurrentnoe otsenivaniye*]. – Moscow : The Science, 1972. – 304 p.

Алгоритм оптимизации, реализуемый на стохастическом процессоре

С.Г. Свистунов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
Санкт-Петербург, Россия,
ssg47@mail.ru

Аннотация. В измерительной технике, радиолокации, гидроакустике часто требуется решить адаптивную задачу идентификации, т. е. построить модель по имеющимся данным об объекте. Примерами могут служить задачи статистической оценки параметров, регрессии, робастное оценивание, рекуррентное оценивание, анализ данных и т. д. Для решения указанной задачи в статье предлагается использовать адаптивный квазиградиентный алгоритм, реализуемый на стохастическом вычислительном устройстве. Предлагаемый подход дает возможность сократить время решения и упростить используемые аппаратные средства. В статье определяется алгоритм для специализированного компьютера.

Использование стохастического компьютера позволяет исключить «медленные» операции: возведение в вещественную степень, умножение и деление многозначных чисел. Это позволяет уменьшить время, затрачиваемое на отдельную итерацию, и в случае случайных сигналов на входе устройства уменьшает среднее время на определение экстремума функции регрессии.

Модифицированный вариант адаптивного стохастического алгоритма с преобразователем *код-вероятность* может быть реализован на стохастическом процессоре с линейным преобразователем. Описано доказательство сходимости метода.

Ключевые слова: экстремум функции регрессии, адаптивные алгоритмы стохастической оптимизации, стохастические вычислительные устройства, преобразователь *код-вероятность*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Урясьев С.П. Адаптивные алгоритмы стохастической оптимизации и теории игр / под ред. Ю. М. Ермольева. – М. : Наука, 1990. – 184 с.
2. Robbins H., Monro S. A stochastic approximation method // Ann. Math. Statistics, 1951, vol. 22. – Pp. 400–407.
3. Kiefer J., Wolfowitz J. Stochastic estimation of the maximum of a regression function // Ann. Math. Statistics, 1952, vol. 23. – Pp. 462–466.
4. Федоров Р.Ф. Стохастические преобразователи информации / Р.Ф. Федоров, В.В. Яковлев, Г.В. Добрис. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. – 303 с.
5. Канторович Л.В. Функциональный анализ / Л.В. Канторович, Г.П. Акилов. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука, 1977. – 741 с.
6. Карманов В.Г. Математическое программирование : учеб. пособие для вузов по специальности «Прикладная математика». – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1986. – 286 с.
7. Ермаков С.М. Математическая теория оптимального эксперимента: Учебное пособие для вузов по специальности «Прикладная математика» / С.М. Ермаков, А.А. Жиглявский. – М. : Наука, 1987. – 318 с.
8. Боровков А.А. Теория вероятностей : учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 432 с.
9. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей : учебник для гос. ун-тов. – 3-е изд., перераб. – М. : Физматгиз, 1961. – 406 с.
10. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. – М. : Наука, 1983. – 384 с.
11. Ширяев А.Н. Вероятность : учебное пособие для университетов по специальности «Математика». – М. : Наука, 1980. – 575 с.
12. Невельсон М.Б. Стохастическая аппроксимация и рекуррентное оценивание / М.Б. Невельсон, Р.З. Хасьминский. – М. : Наука, 1972. – 304 с.