

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 26

2020

№ 5

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

САПР

КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА

МЕТОДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

ОПЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДЫ

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

НЕЙРОСЕТИ И
НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ОПТИМИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

ИТ В ОБРАЗОВАНИИ

ГИС

Рисунки к статье В. В. Аристова, А. Д. Ястребова, А. В. Строганова
**«РАЗВИТИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА РЕШЕНИЯ
 УРАВНЕНИЯ БОЛЬЦМАНА И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ OpenCL»**

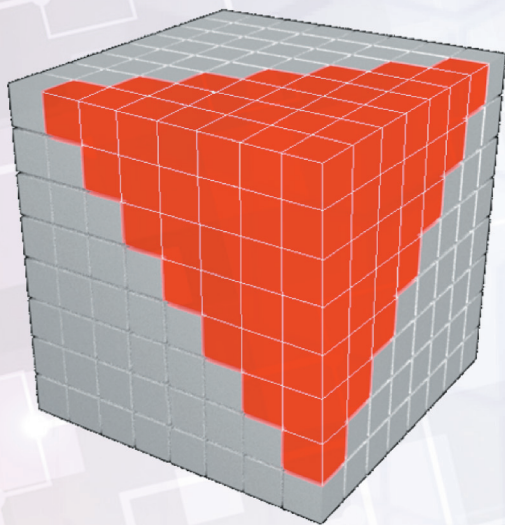


Рис. 1. Нулевые элементы $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$ при $M = 8$

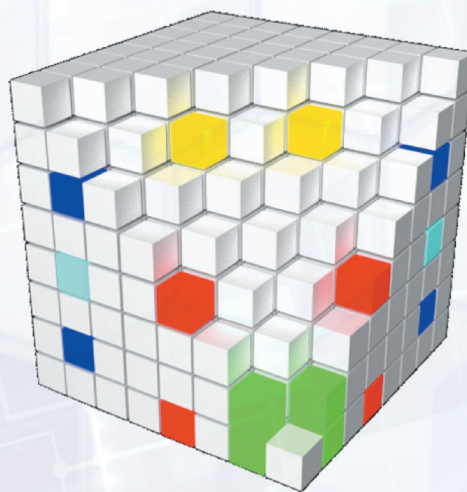


Рис. 2. Элементы $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$ с равными значениями при $M = 8$

Рисунок к статье Т. М. Волосатовой, А. В. Козова, А. А. Тачкова
**«СИСТЕМА ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ
 С ПОЗИЦИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ»**

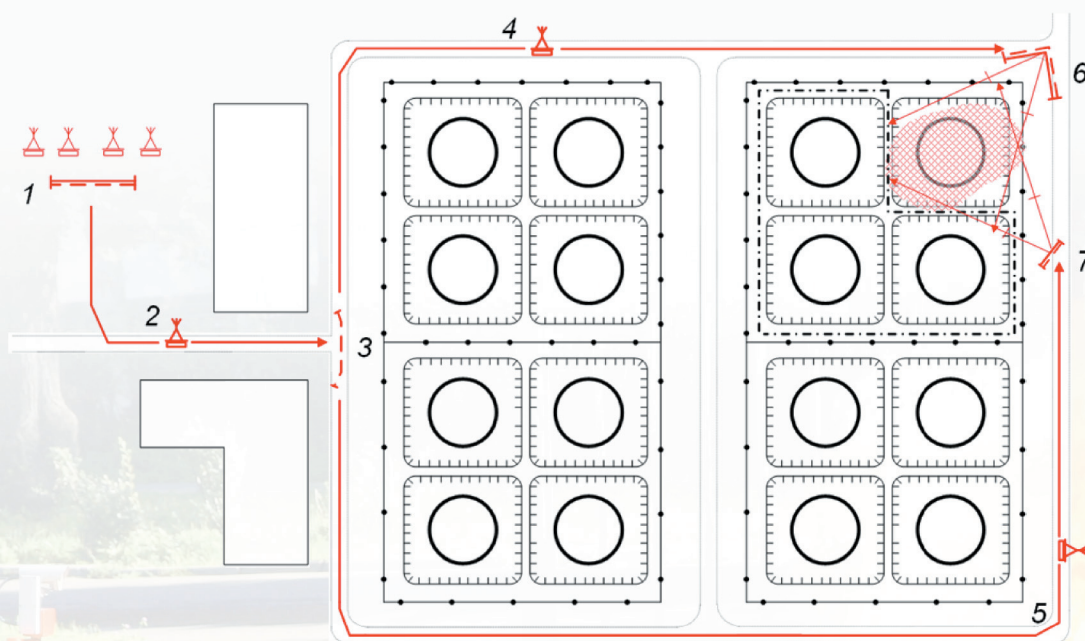


Рис. 1. Групповая операция по тушению пожара в резервуарном парке:
 1 – стартовая позиция роботов; 2, 4, 5 – траектории движения подгрупп;
 3 – промежуточный рубеж для разделения на две подгруппы; 6, 7 – рубежи тушения

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 26
2020
№ 5

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

DOI 10.17587/issn.1684-6400

УЧРЕДИТЕЛЬ

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Иванников А. Д. Сравнительный анализ методов отладки цифровых систем на этапе проектирования 259
- Аристов В. В., Ястребов А. Д., Строганов А. В. Развитие параллельного детерминистического метода решения уравнения Больцмана и его реализация с помощью OpenCL 266

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- Волосатова Т. М., Козов А. В., Тачков А. А. Система группового управления мобильными роботами с позиций автоматизированного проектирования 274

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Басыня Е. А. Система интеллектуально-адаптивного управления информационной инфраструктурой предприятия 283
- Савченко Л. В. Распознавание изолированных слов на основе взвешенного голосового дикторозависимых нейросетевых моделей 290

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Костин В. Н. Оценка потенциала опасности критически важных объектов при возникновении чрезвычайных ситуаций на основе информационно-вероятностного метода и главных компонент 297

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

- Миков А. И., Замятина Е. Б., Калашников С. М. Исследования алгоритмов маршрутизации в SON сетях с использованием программных средств имитационного предсказательного моделирования 302

ДИСКУССИОННЫЙ КЛУБ

- Курцева Г. В. Некоторые замечания к понятиям энтропия и информация .. 311

Главный редактор:

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

Зам. главного редактора:

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

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:

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

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

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

INFORMATION TECHNOLOGIES

INFORMACIONNYYE TEHNOLOGII

Vol. 26
2020
No. 5

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

ISSN 1684-6400

CONTENTS

MODELING

- Ivannikov A. D.** Comparative Analysis of Methods for Digital Systems Debugging at the Design Stage 259
- Aristov A. A., Stroganov A. V., Yastrebov A. D.** Development of a Parallel Deterministic Method of Solving the Boltzmann Equation and its Application Using OpenCL 266

CAD-SYSTEMS

- Volosatova T. M., Kozov A. V., Tachkov A. A.** The Control System for a Group of Mobile Robots from the Perspectives of Automated Designing 274

INTELLIGENT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

- Basinya E. A.** System for Intellectually Adaptive Management of the Enterprise Information Infrastructure 283
- Savchenko L. V.** Isolated Words Recognition Based on Weighted Voting of Speaker-Dependent Neural Network Acoustic Models 290

APPLICATION INFORMATION SYSTEMS

- Kostin V. N.** Assessment of the Hazard Potential of Critical Facilities during Emergency Situations Based on Information Probabilistic Method and Principal Components 297

COMPUTING SYSTEMS AND NETWORKS

- Mikov A. I., Zamyatina E. B., Kalashnikov S. M.** Research of Routing Algorithms in SON Networks Using Simulation Predictive Modeling Software 302

DISCUSSION CLUB

- Kurtseva G. V.** Some Remarks on the Notions of Entropy and Information 311

Editor-in-Chief:

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

Deputy Editor-in-Chief:

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

Chairman:

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

Editorial Board Members:

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

Editors:

Bezmenova M. Yu.

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

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

А. Д. Иванников, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., e-mail: ADI@iprm.ru,
Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН,

Сравнительный анализ методов отладки цифровых систем на этапе проектирования

Рассматриваются методы отладки, т. е. выявления и исправления ошибок в проектах цифровых систем, заданных схемой технических средств и текстом программного или микропрограммного обеспечения. Описывается отладка на изготовленном макете технических средств и на программной модели цифровой системы, а также на сочетании макета отдельных блоков и программной модели остальной части системы. Анализируются методы организации отладочных режимов для всех рассматриваемых методов. Указывается, что для цифровых систем на кристалле наиболее эффективным методом является отладка проектов на программной модели.

Ключевые слова: проектирование цифровых систем, отладка проектов, организация отладочных режимов

Введение

При проектировании цифровых систем, результатом которого является схема соединения блоков и элементов цифровых систем, а также текст программного или микропрограммного обеспечения, важным этапом разработки является отладка, т. е. выявление и исправление ошибок проектирования [1–4]. При постоянно возрастающей сложности современных цифровых систем этап отладки схемы технических средств, программного обеспечения, а также их совместной работы может занимать существенную часть всего этапа проектирования [1, 3, 5].

1. Составляющие процесса отладки

Для проведения отладки проектов цифровых систем необходимы следующие составляющие.

1. Объект отладки, позволяющий по заданному входному воздействию определить реакцию на выходе. Объектом отладки может являться как макет или прототип цифровой системы, так и ее программная модель.

2. Конечный набор конечных по времени входных воздействий (назовем их отладочными тестами), которые подаются на объект отладки во время отладочных экспериментов. Набор отладочных тестов должен обладать

свойством полноты, т. е. из правильности реакции объекта отладки на все тесты набора должна следовать правильность его работы при любых допустимых входных воздействиях.

3. Критерий определения правильности выходной реакции объекта отладки на поданное входное воздействие.

4. Возможность локализации ошибок в цифровой системе при неправильной реакции объекта отладки на заданное входное воздействие.

5. Средства для внесения исправлений в объект отладки и повторения отладочного эксперимента.

Проведем анализ возможных методов отладки цифровых систем на этапе проектирования, рассмотрев поочередно составляющие процесса отладки.

2. Объект отладки и методы отладки цифровых систем на этапе проектирования

Отладка цифровой системы может быть проведена как на изготовленном макете цифровой системы, так и на некоторой модели последней [6–9]. В соответствии с различным представлением разработанной цифровой системы можно выделить четыре метода отладки, возможных на этапе проектирования, а именно:

- метод полного макетирования;

- метод частичного макетирования при использовании типового ядра технических средств;
- метод моделирования на ЭВМ;
- метод моделирования на ЭВМ с использованием реальных блоков технических средств.

При использовании *метода полного макетирования* начало отладки технических средств и программно-микропрограммного обеспечения и их совместной работы возможно только после изготовления макета, что требует материальных затрат и занимает при современной структуре разрабатывающих организаций достаточно длительные сроки.

В процессе анализа работы цифровой системы и локализации ошибок проектирования принципиальной схемы и программно-микропрограммного обеспечения необходимо следить за изменениями содержимого регистров системы и ячеек памяти, а также за логическими сигналами на шинах и линиях технических средств, иметь возможность останавливать и возобновлять выполнение программы или микропрограммы, задавать и модифицировать содержимое внутренних регистров системы и ячеек запоминающих устройств (ЗУ). Если слежение за изменениями логических сигналов на внешних выводах системы в макете может быть осуществлено с помощью логических анализаторов [3, 6, 10], то контроль за изменениями содержимого внутренних регистров и ячеек ЗУ, не имеющих внешних выводов, останов и повторный запуск программы или микропрограммы, задание и изменение содержимого внутренних регистров и ячеек ЗУ, т. е. отладочные режимы, невозможны, если не предусмотрены специальные средства внутри макета. Эти операции могут быть осуществлены только при наличии в макете дополнительных аппаратных затрат, специального программного обеспечения и подключения интерактивных устройств ввода-вывода, например, системы JTAG [7, 11], которая часто предусматривается в разрабатываемой цифровой системе. В ряде случаев в разрабатываемых цифровых системах предусматриваются располагающиеся на кристалле встроенные логические анализаторы, подключаемые к определенным логическим узлам с помощью управляющих логических сигналов [3]. Встраиваемые в цифровую систему дополнительные средства во многом облегчают процесс отладки, но не в полной мере. Кроме того, разработка дополнительных аппаратно-программных средств для эффективной организации отладочных режимов на макете является нетривиальной.

Отладка цифровой системы на макете технических средств при конкретных значениях динамических параметров блоков не гарантирует работоспособность технических средств системы при любых допустимых по ТУ значениях динамических параметров блоков.

Отладка макета совместно с управляемым объектом в реальном времени часто затруднена в связи с невозможностью создания реальных, например, аварийных ситуаций на объекте. Такая отладка может быть осуществлена путем совместного моделирования на ЭВМ цифровой системы и поведения управляемого объекта в одинаковом масштабе времени.

Метод частичного макетирования предполагает разделение технических средств разрабатываемой системы на типовое ядро (центральную часть), одинаковое для данного класса цифровых систем, и часть, например, схемы сопряжения с конкретным объектом управления, присутствующую только в разрабатываемой системе. Типовое ядро, включающее аппаратно-программные средства организации отладочных режимов, может быть изготовлено и отлажено один раз, после чего в сочетании с макетом нетиповой части используется при отладке различных цифровых систем определенного класса.

Так, во многих простейших цифровых системах управления (контроллерах) основная по объему центральная часть (процессорный блок, ЗУ, сопряжение с типовыми внешними устройствами, типовые каналы ввода-вывода) является типовой, в связи с чем метод частичного макетирования для таких систем применим в большей степени, чем для цифровых систем других классов [8, 12–14].

В случае микропрограммируемых систем, для которых характерно большое разнообразие структур и архитектур, в типовое ядро включаются блок микропрограммного управления и ЗУ микропрограмм большой разрядности, а блок обработки данных вместе со схемами сопряжения с обслуживаемым объектом макетируется в соответствии со схемой технических средств разрабатываемой системы. При этом макетируемая часть системы существенно больше, чем в случае систем на основе вычислителей с фиксированной системой команд.

Ввиду фиксированной организации блока микропрограммного управления типового ядра метод частичного макетирования не позволяет получить объекты отладки для всего разнообразия микропрограммируемых цифровых систем.

В случае многопроцессорных цифровых систем метод частичного макетирования может быть также использован. В этом случае макетируемая часть представляет собой нестандартные схемы сопряжения с обслуживаемым объектом и, возможно, обрабатывающие блоки, аппаратно реализующие определенные операции, доля которых в общем объеме технических средств, как правило, не велика. При нетиповой организации многопроцессорной системы применение метода частичного макетирования затруднено в связи с невозможностью выделения существенного по объему типового ядра технических средств.

Таким образом, характеризуя метод частичного макетирования в целом, можно отметить следующее:

1) метод требует меньших затрат на изготовление макета, чем метод полного макетирования;

2) метод может быть эффективно использован при проектировании систем, имеющих существенное по объему типовое ядро технических средств. Применение метода при нетиповой структуре и архитектуре разрабатываемой цифровой системы невозможно;

3) для метода частичного макетирования характерен ряд недостатков, свойственных методу макетирования вообще, а именно:

- трудоемкость внесения изменений в принципиальную схему в процессе отладки;
- невозможность гарантировать работоспособность технических средств при любом допустимом разбросе задержек блоков;
- трудность отладки макета системы совместно с обслуживаемым объектом в реальном времени в связи с невозможностью искусственного создания ряда ситуаций на объекте.

Метод моделирования на ЭВМ предполагает использование в качестве объекта отладки программной модели проектируемой системы [1, 9, 15–18]. Этот метод является универсальным в том смысле, что модель может быть получена для цифровой системы любой структуры и архитектуры, в том числе для нетиповых микропрограммируемых и мультипроцессорных систем.

Проверка работоспособности технических средств цифровой системы для всех допустимых по ТУ значениях динамических параметров блоков одновременно возможна только методом моделирования на ЭВМ. Этот метод принципиально позволяет проводить отладку путем совместного моделирования цифровой системы и обслуживаемого объекта во всех возможных режимах работы последнего [13].

Использование метода моделирования сокращает сроки и стоимость процесса отладки в связи с отсутствием необходимости изготовления макета до окончания отладки проекта.

Недостатком метода моделирования является меньшее относительно макета быстродействие программной модели отлаживаемой системы. Так, при моделировании на уровне системы команд на эмуляцию одной команды процессорного элемента цифровой системы приходится от нескольких десятков до нескольких сотен команд инструментальной ЭВМ. При функционально-логическом моделировании системы на уровне блоков затраты машинного ресурса, как правило, еще больше.

Тем не менее, использование машинных моделей цифровых систем в качестве объекта отладки весьма эффективно вследствие своей универсальности относительно типа отлаживаемых систем, отсутствия необходимости изготовления макета, возможности параллельного анализа нескольких технических решений.

Применение *метода моделирования на ЭВМ с использованием реальных блоков* обусловлено следующим. Как указывалось выше, недостатком использования машинных моделей цифровых систем является большое время моделирования. При моделировании на функционально-логическом уровне обычно каждому блоку соответствует своя программная модель, а модель технических средств в целом генерируется путем комбинации моделей блоков в соответствии с заданной схемой соединения блоков. Модели цифровых блоков сверхвысокой степени интеграции сложны в разработке, занимают большой объем памяти и требуют больших затрат машинного времени при моделировании. В связи с этим известно использование автоматизированных рабочих мест для проектирования, в которых для отладки используется функционально-логическое моделирование на уровне блоков, а центральное вычислительное ядро подключается к системе физически. При этом, однако, возникают две проблемы: отсутствие в процессе отладки доступа к внутренним регистрам физически подключаемого блока и существенно разные скорости работы физического блока и программной модели.

Таким образом, метод моделирования на ЭВМ с использованием реальных блоков позволяет уменьшить затраты времени на моделирование. Тем не менее, этот метод не гарантирует работоспособность отлаживаемой системы при любых допустимых значениях динамических

параметров аппаратно подключаемых блоков. Кроме того, поскольку скорость работы объекта отладки в этом случае определяется моделирующей частью и существенно меньше скорости работы реальной системы, трудно гарантировать работоспособность системы при реальном режиме работы.

Метод моделирования с использованием реальных блоков следует рассматривать как расширение метода моделирования.

3. Локализация ошибок в проектах цифровых систем

Единственным универсальным методом локализации ошибок как в схеме технических средств, так и в программно-микропрограммном обеспечении на этапе отладки проекта является анализ разработчиком внутренних переменных: содержимого ячеек памяти и регистров, а также логических сигналов на шинах и линиях цифровой системы в процессе ее работы. Избирательный и детальный анализ указанных внутренних переменных в сочетании со знанием требуемого функционирования разрабатываемой системы позволяет разработчику предположить и проверить наличие конкретных ошибок в проекте.

Таким образом, возможность удобного и детального анализа изменения внутренних переменных цифровой системы является основным средством локализации ошибок проектирования.

При использовании *метода полного макетирования* слежение за логическими сигналами на шинах системы и выводах блоков осуществляется с помощью логических анализаторов различных типов, в том числе встроенных в проектируемую систему. Эти приборы позволяют проверить логические диаграммы в узлах принципиальной схемы при возникновении заданных условий.

Слежение за изменением содержимого внутренних регистров блоков и ячеек ЗУ, а также организация отладочных режимов программно-микропрограммного обеспечения при методе полного макетирования осуществляется с помощью загружаемых в ОЗУ системы отладочных мониторов. Однако без дополнительных аппаратных средств организации отладочных режимов выполнение программного обеспечения осуществляется медленнее, чем в реальной аппаратуре. Отладочные мониторы, ориентированные на слежение за содер-

жимым ячеек ЗУ и регистров типовой части, не позволяют анализировать состояние регистров нетиповых схем сопряжения с внешними устройствами.

В случае нетиповых микропрограммируемых и мультипроцессорных систем использование типовых отладочных мониторов невозможно. Создание же мониторов для каждой конкретной системы дорого и является нетривиальной задачей.

Метод частичного макетирования предполагает использование в качестве типового ядра специальных аппаратно-программных отладочных комплексов, которые представляют собой универсальные цифровые системы с большим объемом ЗУ (включая внешнее ЗУ на магнитных носителях), широким набором внешних устройств, в том числе логических анализаторов, и резидентной системой разработки и отладки программного обеспечения. В отладочных комплексах предусматриваются специальные аппаратные и программные средства организации отладочных режимов, позволяющие выполнять останов в нужных точках программы или микропрограммы, следить за изменениями и модифицировать содержимое ячеек ЗУ и регистров типового ядра системы [8, 12, 14].

Существенно расширяет возможности отладочных комплексов наличие внутрисхемных эмуляторов — аппаратных блоков, включающих процессор, архитектурно эквивалентный используемому в отлаживаемой системе, и аппаратно реализованные схемы слежения за логическими сигналами на шине системы, которые подключаются к макету технических средств отлаживаемой системы вместо микропроцессора. Использование внутрисхемных эмуляторов позволяет проводить совместную отладку технических средств и программного обеспечения в реальном времени, а также подключать макет цифровой системы к обслуживаемому объекту для совместной отладки. При этом возможно поэтапное наращивание и отладка технических средств путем последовательной передачи функций от плат типового ядра, расположенного в отладочном комплексе, к добавляемым платам макета. В сочетании с логическими анализаторами аппаратно-программные отладочные комплексы являются мощным средством отладки цифровых систем.

В случае цифровых систем, использующих микропрограммирование, отладочный комплекс, как правило, включает ОЗУ, моделирующее ПЗУ микрокоманд, а также универсальную ЭВМ для управления работой комплекса.

Наличие типового блока микропрограммного управления позволяет создать системное программное обеспечение, обеспечивающее организацию отладочных режимов выполнения микропрограмм и слежения за логическими сигналами на шине системы, что в случае отладки микропрограммируемых систем особенно необходимо. Однако такие комплексы могут использоваться при отладке микропрограммируемых цифровых систем только со стандартной структурой шин и стандартным протоколом обмена информацией по шинам, а также типовой микроархитектурой, что ограничивает применение отладочных комплексов для микропрограммируемых систем типовыми или близкими к типовым системами.

В случае мультипроцессорных систем аппаратно-программные отладочные комплексы также используются. Ряд известных аппаратно-программных отладочных комплексов имеют внутрисхемные эмуляторы, позволяющие одновременно следить за работой двух и более процессорных блоков, входящих в сосредоточенную мультипроцессорную систему.

Применение аппаратно-программных отладочных комплексов, используемых одновременно как стандартное ядро с встроенными средствами организации отладочных режимов и как автоматизированное рабочее место для разработки программного и, в ряде случаев, микропрограммного обеспечения, является одним из основных факторов, обуславливающих широкое применение метода частичного макетирования при отладке цифровых систем.

При использовании для отладки *метода моделирования* слежение как за изменениями содержимого ячеек ЗУ и внутренних регистров всех блоков системы, так и за логическими значениями сигналов во всех узлах схемы не вызывает трудностей, так как они представляются переменными в моделях. Удобство задания любых отладочных режимов, условий вывода информации и самой информации о функционировании модели определяется организацией системы моделирования и языком управления ее работой.

В последние годы в системах моделирования цифровых систем нашли применение методы работы с большими данными, т. е. не выделение наиболее значимых переменных при моделировании и поиске ошибок, а запоминание при моделировании системы на уровне регистровых передач всех данных независимо от их значимости. При этом при обнаружении ошибки в каких-либо переменных — логических сигналах или содержимым регистров —

возможен обратный просмотр хода моделирования для обнаружения причины ошибки [1].

При применении *метода моделирования с использованием реальных блоков* в качестве последних необходимо выбирать те блоки, слежение за внутренними регистрами которых не является обязательным для отладки.

4. Внесение исправлений в проект

Внесение исправлений в текст программно-микропрограммного обеспечения, находящегося в ОЗУ, осуществляется обычными способами и трудностей не вызывает. Внесение же изменений в схему технических средств при методе полного или частичного макетирования требует физического изменения схемы: изменения подключения блоков к узлам схемы, удаления, добавления или модификации блоков. Это требует определенных временных затрат, особенно при существенных изменениях в схеме. Внесение изменений в моделируемую схему технических средств выполняется путем редактирования машинной модели разработчиком в интерактивном режиме и практически не требует временных затрат.

5. Отладочные тесты и определение правильности выходной реакции

Выбор набора отладочных тестов и определение правильности выходной реакции является общей задачей для всех методов отладки цифровых систем.

Задача выбора отладочных тестов существенно отличается от задачи выбора проверяющих и диагностических тестов цифровой аппаратуры, используемых на этапе производства и обслуживания, тем, что при отладке цифровых систем на этапе проектирования отсутствуют модели возможных ошибок. Задача выбора отладочных тестов как для технических средств, так и для цифровых систем в целом по своей постановке в определенной степени близка задаче синтеза тестовых примеров для отладки программ. Отладочные тесты должны выбираться в первую очередь исходя из функций, выполняемых цифровой системой и определенных техническим заданием на ее разработку, а также, возможно, структуры разработанной системы [19—22].

Независимо от метода выбора тестов при отладке необходимо определять правильность

Сравнительный анализ методов отладки проектов цифровых систем

Показатель	Метод полного макетирования	Метод частичного макетирования	Метод моделирования	Метод моделирования с использованием физических блоков
Класс отлаживаемых систем	Любые	Системы, имеющие типовое ядро	Любые	Системы, имеющие выбранные блоки
Организация отладочных режимов	Затруднена	Проста, исключая слежение за регистрами нетиповой части	Проста	Проста, исключая слежение за регистрами физических блоков
Трудоемкость внесения изменений в схему	Высока	Высока	Низка	Низка
Возможность отладки проекта до изготовления макета	Нет	После изготовления макета нетиповых блоков	Да	Да
Стоимость	Высокая	Средняя	Низкая	Низкая
Длительность, включая время изготовления макета, если необходимо	Большая	Средняя	Малая	Малая

или ошибочность реакции объекта отладки. Наиболее удобным, но не всегда возможным в практике проектирования является случай, когда разработчик в точности знает требуемую реакцию объекта отладки на любой тест. Часто разработчик заранее в точности не знает правильную реакцию на отладочный тест, но после получения результата и, возможно, анализа промежуточных данных может сказать, соответствует ли полученная реакция объекта отладки требуемой. В любом случае возможность разработчика определить правильность реакции объекта отладки на поданное входное воздействие является необходимым условием проведения отладки вообще.

Таким образом, на основе анализа методов отладки цифровых систем (см. таблицу) можно сказать, что потенциально только метод моделирования на ЭВМ является универсальным относительно структуры и архитектуры отлаживаемых цифровых систем. Этот метод наиболее широко применяется при разработке современных цифровых систем в микроэлектронном исполнении, однако и другие методы также находят применение.

Список литературы

1. Kishore Karnane, Corey Goss. Automated Root-Cause Analysis to Reduce Time to Find Bugs by Up to 50 %. URL: www.cadence.com.
2. Вишнеков А. В., Ерохин В. В., Иванова Е. М. Верификация СНК: выбор стратегии // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 12. С. 30–36.
3. Слинкин Д. И. Анализ современных методов тестирования и верификации проектов сверхбольших интегральных схем // Программные продукты и системы. 2017. Т. 30, № 3. С. 401–408.

4. Иванников А. Д., Стемковский А. Л. Формализация задачи отладки проектов цифровых систем // Информационные технологии. 2014. № 9. С. 3–10.
5. Гаращенко А. В., Николаев А. В., Путря Ф. М., Сардарян С. С. Система комбинируемых специализированных генераторов тестов для нового поколения VLIW DSP процессоров с архитектурой Elcore50 // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2018. № 2. С. 9–15.
6. Ilias Alexopoulos. How to Debug Embedded Systems. URL: <https://www.EDN.com> (date of access Dec. 11, 2012).
7. Жезлов К. А., Колбасов Я. С., Козлов А. О., Николаев А. В., Путря Ф. М., Фролова С. Е. Автоматизация процесса создания тестовых окружений, обеспечивающая сквозной маршрут разработки, верификации и исследования СФ-блоков и СНК // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2016. № 2. С. 46–53.
8. Považan I., Krnjetin M., Četić N. Communication interface libraries as an extension to the debugging framework for DSP applications // 2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR). Belgrade. 2015. P. 1005–1008.
9. Абрамов Е. М., Егоров А. В., Козлов А. О., Поперечный П. С., Путря Ф. М., Фролова С. Е. Выбор платформ прототипирования для СФ-блоков и подсистем СНК // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 8. С. 76–83.
10. Зотов В. Инструментальные средства разработки и отладки цифровых устройств и встраиваемых микропроцессорных систем, проектируемых на основе ПЛИС FPGA фирмы XILINX серии Kintex-7 // Компоненты и технологии. 2012. № 4 (129). С. 124–132.
11. Hu X., Jin Y., Li Z. A Parallel JTAG-based Debugging and Selection Scheme for Multi-core Digital Signal Processors // 2018 IEEE International Conference of Safety Produce Informationization (IICSPI). Chongqing, China. 2018. P. 527–530.
12. Иванов С. А., Орешкин Д. М. Аппаратно-программный комплекс для разработки и отладки электронных систем на цифровых микропроцессорных модулях // Новая наука: от идеи к результату. 2016. № 8-1 (96). С. 27–29.
13. Klinachev N. V., Shaburov P. O. Technique for debugging of the data exchange between the PC and microprocessor-controlled electromechanical systems based on the modbus RTU protocol // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). St. Petersburg. 2017. P. 1–5.
14. Стрелец А. И., Протопопова Ю. Д., Иванников В. С. Универсальная система для тестирования цифровых устройств // Научный журнал. 2018. № 5 (28). С. 41–44.

15. Lin Yi-Li, Su Alvin W. Y. Functional Verification for SoC Software/Hardware Co-Design: From Virtual Platform to Physical Platform // 2011 IEEE International SOC Conference (SOCC). 2011. P. 201–206.

16. Shi Jin, Liu Weichao, Jiang Ming et al. Software Hardware Co-Simulation and Co-Verification in Safety Critical System Design // 2013 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). 2013. P. 71–74.

17. Nguyen M. D. Hardware/software formal co-verification using hardware verification techniques // Fourth Int. Conf. on Communications and Electronics (ICCE). 2012. P. 465–470.

18. Ивannиков А. Д. Теоретические основы выбора множества отладочных тестов проектов цифровых систем на основе алфавита выполняемых функций // Информационные технологии. 2019. Т. 25, № 11. С. 657–662.

19. Камкин А. С., Коцыняк А. М., Смолов С. А., Татарников А. Д., Чупилко М. М., Сторгов А. А. Средства функциональной верификации микропроцессоров // Сб. Трудов Института системного программирования РАН. 2014. Т.26, № 1. С. 149–200.

20. Мешков А. Н., Рыжов М. П., Шмелев В. А. Развитие средств верификации микропроцессора "ЭЛЬБРУС" // Вопросы радиоэлектроники. 2014. Т. 4, № 3. С. 5–17.

21. Ивannиков А. Д. Формирование отладочного набора тестов для проверки функций цифровых систем управления объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 12. С. 795–801.

22. Ивannиков А. Д. Автоматизация генерации отладочных тестов для проектов цифровых систем управления объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 12. С. 770–776.

A. D. Ivannikov, Doctor of Tech.Sc., e-mail: ADI@ippm.ru,
Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences

Comparative Analysis of Methods for Digital Systems Debugging at the Design Stage

The paper discusses debugging methods, that is, identifying and correcting errors in projects of digital systems specified by the hardware diagram and the text of software or firmware. Debugging is considered on a fabricated layout of hardware and on a software model of a digital system, as well as on a combination of the layout of individual blocks and a software model of the rest of the system. The methods of organizing debugging modes for all considered methods are analyzed. It is indicated that for digital systems on a chip, the most effective method is to debug projects using a software model.

Keywords: design of digital systems, design debugging, organization of debugging modes

DOI: 10.17587/it.26.259-266

References

1. Kishore Karnane, Corey Goss. Automated Root-Cause Analysis to Reduce Time to Find Bugs by Up to 50 %, available at: www.cadence.com.

2. Vishnekov A. V., Erohin V. V., Ivanova E. M. SoC Verification: Choice of Strategy, *Nano- i Microsystemnaya Tekhnika*, 2014, no. 12, pp. 30–36 (in Russian).

3. Slinkin D. I. Analysis of Modern VLSI Project Testing and Verification Methods, *Programmnie Produkti i Systemi*, 2017, vol. 30, no. 3, pp. 401–408 (in Russian).

4. Ivannikov A. D., Stempkovsky A. L. Formal Model of Digital System Design Debugging Task, *Informacionnie Tekhnologii*, 2014, no. 9, pp. 3–10 (in Russian).

5. Garashchenko A. V., Nikolaev A. V., Putrya F. M., Sardaryan S. S. of Combined Specialized Test Generators for the New Generation of VLIW DSP Processors with Elcore50 Architecture, *Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development* — 2018, 2018, iss. 2, pp. 9–15 (in Russian).

6. Ilias Alexopoulos. How to Debug Embedded Systems, available at: <https://www.EDN.com> (date of access Dec. 11, 2012).

7. Zhezlov K. A., Kolbasov Y. S., Kozlov A. O., Nikolaev A. V., Putrya F. M., Frolova S. E. Automation of verification environments development process providing a through design flow for design, verification and research of IP-blocks and SoC, *Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development* — 2016, 2016, iss. 2, pp. 46–53 (in Russian).

8. Považan I., Krnjetic M., Četić N. Communication interface libraries as an extension to the debugging framework for DSP applications, *2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, Belgrade, 2015, pp. 1005–1008.

9. Abramov E. M., Egorov A. V., Kozlov A. O., Poperech-niy P. S., Putrya F. M., Frolova S. E. Prototype Platform Choosing for IP Blocks and SoC Subsystems, *Voprosi Radioelektroniki*, 2017, no. 8, pp. 76–83 (in Russian).

10. Zotov V. Design and Debugging Means for Digital Devices and In-Circuit Microprocessor Systems on the Bases of XILINX FPGA Kintex-7 Series, *Komponenti i Tekhnologii*, 2012, no. 4 (129), pp. 124–132 (in Russian).

11. Hu X., Jin Y., Li Z. A Parallel JTAG-based Debugging and Selection Scheme for Multi-core Digital Signal Processors, *2018 IEEE International Conference of Safety Produce Informatization (IICSPI)*, Chongqing, China, 2018, pp. 527–530.

12. Ivanov S. A., Oreshkin D. M. Hardware-Software Complex for Development and Debugging of Electronic Systems Based on Digital Microprocessor Modules, *Novaya Nauka: ot Idei kResultatu*, 2016, no. 8-1 (96), pp. 27–29 (in Russian).

13. Klinachev N. V., Shaburov P. O. Technique for debugging of the data exchange between the PC and microprocessor-controlled electromechanical systems based on the modbus RTU protocol, *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, St. Petersburg, 2017, pp. 1–5.

14. Strelec A. I., Protopopova U. D., Ivannikov V. S. Universal System for Digital Device Testing, *Nauchniy Jurnal*, 2018, no. 5 (28), pp. 41–44 (in Russian).

15. Lin Yi-Li, Su Alvin W. Y. Functional Verification for SoC Software/Hardware Co-Design: From Virtual Platform to Physical Platform, *2011 IEEE International SOC Conference (SOCC)*, pp. 201–206.

16. Shi Jin, Liu Weichao, Jiang Ming et al. Software Hardware Co-Simulation and Co-Verification in Safety Critical System Design, *2013 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, pp. 71–74.

17. **Nguyen M. D.** Hardware/software formal co-verification using hardware verification techniques, *Fourth Int. Conf. on Communications and Electronics (ICCE)*, 2012, pp. 465–470.

18. **Ivannikov A. D.** Theoretical Basis for the Selection of Design Debugging Tests Set for Digital Systems Based on the Alphabet of Functions Performed, *Informacionnie Tekhnologii*, 2019, vol. 25, no. 11, pp. 657–662 (in Russian).

19. **Kamkin A. S., Kotsynyak A. M., Smolov S. A., Tarnikov A. D., Chupilko M. M., Sortov A. A.** Means of functional verification of microprocessors, *Sat. Proceedings of the Institute*

for System Programming of the Russian Academy of Sciences, 2014, vol. 26, no. 1, pp. 149–200 (in Russian).

20. **Meshkov A. N., Rijov A. N., Shmelev V. A.** Microprocessor "Elbrus" Verification Means Development, *Voprosi Radioelektroniki*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 5–17 (in Russian).

21. **Ivannikov A. D.** Debugging Input Set Generation for Testing of Control Digital Systems Functions, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 795–801 (in Russian).

22. **Ivannikov A. D.** Control Digital System Function Set Defining for Debugging Tests Development, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 12, pp. 770–776 (in Russian).

УДК 004.023

DOI: 10.17587/it.26.266-273

В. В. Аристов, д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотр., e-mail: aristovvl@yandex.ru, Вычислительный центр им. Дородницына ФИЦ "Информатика и управление" РАН.

МИРЭА — Российский технологический университет,

А. Д. Ястребов, аспирант. e-mail: andryast711@gmail.com,

А. В. Строганов, канд. физ.-мат. наук, e-mail: savthe@gmail.com,

МИРЭА — Российский технологический университет

Развитие параллельного детерминистического метода решения уравнения Больцмана и его реализация с помощью OpenCL

Предлагается оптимизация алгоритма для детерминистического метода решения кинетического уравнения Больцмана с использованием параллельных вычислений. Приводятся примеры применения метода для задач изучения динамики распределения средств и активов в экономических проблемах. Проводится сравнение использования ресурсов компьютера для приведенных алгоритмов и алгоритмов, описанных в более ранних работах. Показаны преимущества усовершенствованных алгоритмов.

Ключевые слова: уравнение Больцмана, детерминистический метод, эконофизика, параллельные вычисления, OpenCL

Введение

Интегриродифференциальное уравнение Больцмана описывает динамику статистического распределения частиц в газе [1]. С помощью некоторых его обобщений можно моделировать неравновесные течения в более сложных средах. Уравнение Больцмана является основным уравнением физической кинетики. Оно имеет достаточно широкое применение не только при изучении динамики разреженного газа, но используется и в других областях механики и иных наук. Уравнение Больцмана применимо для идеального разреженного газа, для которого усредненной по времени потенциальной энергией взаимодействия молекул можно пренебречь по сравнению с их кинетической энергией. Кинетическая теория применяется в задачах аэродинамики обтекания объектов на больших высотах, задачах о течениях на микромасштабах, например, в совре-

менных вакуумных приборах и микроэлектромеханических системах, а также в других приложениях.

В последние годы получила развитие эконофизика — наука, применяющая методологию физики для анализа экономических данных. В ней находят применение различные методы описания динамических систем, в том числе уравнение Больцмана и другие кинетические уравнения. Появилось достаточно много исследований по этой тематике, опубликован ряд важных статей, издано несколько монографий, см., например, работы [2–7]. Получены интересные результаты, в которых моделируются различные процессы в экономике. Вместе с тем, неравновесные процессы требуют привлечения более сложного кинетического аппарата.

В настоящей работе предлагается использовать уравнение Больцмана в простой физической ситуации — пространственно однородной изотропной релаксации, но для ряда

экономических задач этого оказывается достаточно. При этом по сравнению с указанными исследованиями, где в основном исследуются стационарные распределения, будет изучаться динамика неравновесных распределений средств в зависимости от числа населения и характер перехода к равновесным стационарным состояниям. Рассматривается динамика перехода от неравновесных распределений к равновесному. Изучаются две задачи. В первой задаче моделируется процесс экономического перераспределения средств (активов), связанный с ваучеризацией в России в 90-е годы, когда фактически происходил переход от начального существенно неравновесного состояния к стационарному равновесному. Во второй задаче задается стационарная неравновесная ситуация: распределение доходов населения в Аргентине в 2002 г. Изучается, какова была бы картина перехода к равновесию, если был бы включен механизм простого рынка обменов.

Основная цель исследований в настоящей работе состоит в развитии детерминистического метода решения уравнения Больцмана с параллельными вычислениями на видеокартах. Детерминистические методы привлекательны своей простотой, но требуют усовершенствования, поскольку матрица коэффициентов квадратичной формы, аппроксимирующей интеграл столкновений, достаточно большая. Для развития и улучшения таких методов есть несколько путей, которые используют отечественные и зарубежные исследователи. Один из них — разработка новых алгоритмов параллельных вычислений, поскольку детерминистический подход предоставляет для этого различные возможности. Второй способ — изучение свойств данной матрицы и сокращение необходимого числа элементов в ней. Безусловно, допустимо и желательно сочетание указанных возможностей. Ранее предложенный в работах [8, 9] метод был в модифицированном виде применен в статье [10] для случая пространственно-однородной изотропной релаксации.

В работе [11] детерминистический метод был усовершенствован с использованием свойств разреженности данной матрицы коэффициентов и различных свойств ее симметрии. Здесь применялись впервые в данном методе и параллельные алгоритмы. Также в этих работах был впервые использован галеркинский подход. В дальнейшем такой подход был применен в статье [12], где изучались дальнейшие усовершенствования алгоритма с использованием различных свойств данной матрицы ко-

эффициентов. В работах [13, 14] параллельные вычисления с помощью видеокарт для детерминистического метода решения уравнения Больцмана сравнивались с популярным подходом DSMC метода статистического моделирования. Оказалось, что во всяком случае для релаксационных задач указанный параллельный алгоритм имеет преимущества по быстродействию. Все это говорит о вычислительной перспективности развиваемого в настоящей работе подхода.

1. Описание задачи и метода решения

Для построения модели простого рынка вначале запишем классическое уравнение Больцмана для пространственно-однородного случая:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = I(f, f),$$

где $f(t, \xi)$ — функция распределения; t — время; $\xi \in \mathbb{R}_\xi^3$ — скорость молекулы; $I(f, f)$ — интеграл столкновений, который определяет скорость изменения функции плотности распределения частиц вследствие столкновений между ними, он может быть записан в разных формах, например, так:

$$I(f, f) = \int_{\mathbb{R}_\xi^3} \int_{\mathbf{g} \cdot \mathbf{n} < 0} B(\mathbf{g}, \mathbf{n}) [f'f'_1 - ff_1] d\mathbf{n} d\xi_1,$$

где $f = f(\xi)$, $f_1 = f(\xi_1)$, $f' = f(\xi')$, $f'_1 = f(\xi'_1)$, $\mathbf{n}$ — единичный вектор, соединяющий центры частиц при столкновении и направленный от частицы со скоростью ξ к частице со скоростью ξ_1 , $\mathbf{g} = \xi - \xi_1$ — относительная скорость двух частиц; $\xi' = \xi + (\mathbf{g} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}$, $\xi'_1 = \xi_1 - (\mathbf{g} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}$. $B(\mathbf{g}, \mathbf{n})$ — ядро столкновений, которое для упрощения используется в виде $B(|\mathbf{g} \cdot \mathbf{n}|) = a^2 c_s \left(\frac{|\mathbf{g} \cdot \mathbf{n}|}{c_s} \right)^\theta$, где a — радиус частиц; c_s — характеристическая средняя скорость частиц, $\theta \in \mathbb{N} \cup \{0\}$. $\theta = 1$ используется для модели твердых сфер, а $\theta = 0$ — для постоянного ядра столкновений. Такое ядро используется в экономифизике, так как в экономифизических моделях аналогом обмена энергией при столкновении частиц является обмен агентами между собой некоторым количеством денег или товаров, не зависящий от "относительной скорости" $\mathbf{g}$ (вопрос о значении этого параметра в контексте экономифизики выходит за рамки данной работы).

Интеграл столкновений для постоянного сечения столкновений частиц может быть раз-

делен на интеграл прямых и интеграл обратных столкновений. При этом можно перейти от рассмотрения скоростей частиц к рассмотрению энергий частиц, как это было сделано в работе [9]. На i -м шаге по времени имеем:

$$I_i = N_i - v_i f_i.$$

Таким образом, задача сводится к вычислению интеграла обратных столкновений N_i и интеграла прямых столкновений v_i . I_i — интеграл столкновений в момент времени i , для которого в точности выполняются законы сохранения энергии при столкновениях частиц и в целом, с учетом разбиения на M ячеек. Значения для N_i и v_i вычисляются по следующим формулам:

$$N_i = F \Delta E^{3/2} \sum_{j=1}^M \left(j - \frac{1}{2} \right)^{1/2} \psi_{ij}, \quad (1)$$

$$\psi_{ij} = \sum_{\lambda=1}^{M_{ij}} f_{k(\lambda)} f_{l(\lambda)} \hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)},$$

$$v_i = F \Delta E^{3/2} \sum_{j=1}^M \left(j - \frac{1}{2} \right)^{1/2} f_j A_{ij}, \quad A_{ij} = \sum_{\lambda=1}^{M_{ij}} \hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}, \quad (2)$$

где $F = 2^{3/2} \pi^2 a^2 c_s$, $\Delta E = E_{i+1} - E_i$ — ширина шага в пространстве энергий. $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$ — трехмерная структура, хранящая безразмерные значения, зависящие только от максимальной энергии, числа ячеек энергии и выбранного ядра столкновений. Без учета закона сохранения энергии $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$ является четырехмерной, но, в силу закона сохранения энергии, $i + j = k + l$, т. е. для фиксированных i и j можно записать:

$$l(\lambda) = i + j - k(\lambda), \quad \lambda = \overline{1, M_{ij}},$$

где M_{ij} — число ячеек энергии, куда может перейти частица с энергией E_i при столкновении с частицей с энергией E_j . Например, при столкновении двух частиц с минимальной энергией ($i = 1, j = 1$) могут появиться только две аналогичные частицы $\{k(1) = 1, l(1) = 1\}$ и $M_{(1)(1)} = 1$. Однако, при столкновении двух частиц с суммарной энергией $M + 1$ существует M вариантов пар (от $\{k(1) = 1, l(1) = M\}$ до $\{k(1) = M, l(1) = 1\}$), и $M_{(\alpha)(M+1-\alpha)} = M, \alpha = \overline{1, M}$. Значения $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$ получаются из значений Ω_{ij}^{kl} с помощью DVM-коррекции, необходимой для выполнения закона сохранения энергии [10]. При $\theta = 0$

$$B_{ij}^{kl} = \int_{\Omega_{ij}^{kl}} dx dy,$$

где x, y — косинусы углов между скоростями двух сталкивающихся частиц и вектором, соединяющим их центры, а Ω_{ij}^{kl} — множество возможных пар (x, y) , в большинстве случаев отличное от $[-1; 1] \times [-1; 1]$, так как не при всех углах столкновения двух частиц, имеющих энергии E_i и E_j , возможны энергии E_k и E_l после столкновения при зафиксированных i, j, k, l .

Значения структуры $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$ и, следовательно, значения A_{ij} зависят только от максимальной энергии, числа ячеек энергии и выбранного ядра столкновений, поэтому могут быть вычислены заранее и не влияют на вычислительную сложность алгоритма.

2. Параллельный алгоритм

Будем вычислять (i, j) -ю компоненту интеграла столкновений в j -м потоке на i -м вычислительном ядре. Суммирование по j в формулах (1), (2) выполняется параллельно с помощью алгоритма *sum reduction*, в итоге вычисляется i -я компонента.

Для применения данной модификации алгоритма на системе с видеокарты необходимо, чтобы видеокарта имела достаточный объем оперативной памяти для хранения всех значений структуры $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$ (занимающих большую часть памяти компьютера), всех значений A_{ij} , всех текущих значений f_i , а также для сохранения всех новых значений f_i . Так, например, для вычисления интеграла столкновений при $M = 512$ необходимо, чтобы видеокарта имела по крайней мере 6 Гбайт оперативной памяти.

При использовании M ядер видеокарты с M потоками на каждом ядре, где каждому i соответствует одно ядро, а каждому j соответствует один поток, имеем следующий алгоритм:

1. Вычисление ψ_{ij} по формуле (1) каждым потоком в отдельности.
2. Вычисление выражений под знаком суммы для N_i и v_i .
3. Получение значений N_i и v_i с помощью метода сокращения суммы. Полученные значения хранятся в памяти первого потока для каждого ядра видеокарты.
4. Решение дифференциального уравнения на каждом ядре для получения значения f_i на следующем шаге по времени.

Эти действия повторяются для каждого шага по времени. Для хранения $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$ в памяти видеокарты необходимо перейти к одномерному массиву $\hat{B}^*$, причем таким образом,

чтобы для каждого $k(\lambda)$ "соседние" потоки обрабатывались к соседним элементам $\hat{B}_{ijk}^*$ массива $\hat{B}^*$. Для этого элементы должны располагаться в памяти таким образом, чтобы индекс элемента $\hat{B}_{ijk}^*$ в одномерном массиве $\hat{B}^*$ был равен $iM^2 + kM + j$, где $i, j, k \in [0, M)$. Такое расположение элементов в памяти видеокарты позволяет всем потокам считывать каждый (i, j, k) -й элемент (при фиксированных i и j) одновременно, что на практике дает ощутимое ускорение работы программы за счет многократного уменьшения времени чтения данных из памяти.

Из выражений (1), (2) видно, что для каждой пары (i, j) сложность вычисления ψ_{ij} составляет $O(M)$. Также видно, что для каждого i сложность равна $O(M^2)$. Так как $i = \overline{1, M}$, то в итоге сложность алгоритма для одного шага по времени равна $O(M^3)$. Для алгоритма в целом с учетом числа шагов по времени T сложность оценивается как $O(TM^3)$.

Сложность параллельного алгоритма остается, очевидно, такой же, однако распараллеливание позволяет сократить требуемое время вычислений фактически в M раз при наличии подходящего устройства. Таким образом, можно считать, что для параллельного алгоритма сложность стремится к $O(TM^2)$.

3. Оптимизация объема используемой памяти

В работе [10] предлагается программа HOMISBOLTZ для MATLAB/Octave, являющаяся простым и компактным примером реализации описанного выше метода решения одномерного изотропного уравнения Больцмана. Так как задачи оптимизации этой программы не ставилось, существуют разные варианты ее улучшения.

Оптимизация объема используемой памяти возможна за счет сокращения количества вспомогательных данных, а также благодаря DVM-коррекции и возникающей вследствие коррекции симметричности матрицы $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$.

Для хранения значений матрицы $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$ в программе HOMISBOLTZ используется двумерный массив структур, в которых кроме необходимых значений находятся вспомогательные значения, помогающие определять при вычислениях минимальное и максимальное значения индекса k для пары (i, j) , число индексов k , аналогичные значения для l . Эти вспомогательные значения увеличивают объем

требуемой памяти, так как к каждому из значений с плавающей точкой $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$, занимающих 8 байт каждое, прибавляются целочисленные значения $k(\lambda)$, $l(\lambda)$, $nEkm(\lambda) = k(\lambda) - 1$, $nEkp(\lambda) = k(\lambda)$, занимающие по 4 байта каждое. Таким образом, объем необходимой памяти увеличивается с 8 до 24 байт для каждого элемента $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$, т. е. в 3 раза. Также необходима память под число индексов k, l для каждой пары (i, j) , но их число сравнимо с $O(M^2)$, в то время как число элементов $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$ сравнимо с $O(M^3)$, поэтому числом индексов можно пренебречь. В оригинальном методе [8, 9] используются значения B_{ij}^{kl} , которые хранятся в трехмерной матрице с M^3 значениями, часть из которых является нулевыми. Переход к энергиям увеличивает число нулевых элементов и упрощает понимание, какие именно элементы являются нулевыми:

$$B_{ij}^{kl} = 0 \Leftrightarrow \nexists l : i + j = k + l; \quad i, j, k, l \in [1, M].$$

На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) выделенные элементы — нулевые. Также нулевыми являются элементы, симметричные относительно центра структуры, так как аналогично двум частицам с низкими энергиями, которые не могут получить высокую энергию, две частицы с высокими энергиями не могут получить низкую энергию. Можно найти точное число ненулевых значений в $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$. Для зафиксированного i число элементов равно

$$M \frac{1+M}{2} + (i-1)(M-i).$$

Таким образом, число всех элементов в массиве равно

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^M \left(M \frac{1+M}{2} + (i-1)(M-i) \right) &= \\ &= M^2 \frac{1+M}{2} + \frac{M}{6} (M^2 - 3M + 2). \end{aligned}$$

В пределе отношение этого числа к M^3 равно

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \frac{M^2 \frac{1+M}{2} + \frac{M}{6} (M^2 - 3M + 2)}{M^3} = \frac{2}{3}.$$

В итоге, вычисляя все вспомогательные значения, можно сократить объем используемой памяти по сравнению с оригинальным методом [8, 9] в 1,5 раза.

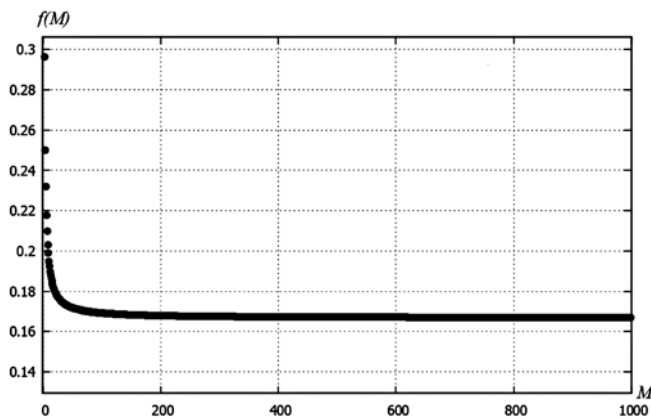


Рис. 3. Отношение числа уникальных элементов $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$ в модифицированном методе к этому же числу в оригинальном методе

Благодаря симметрии в матрице $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$ можно дополнительно сократить требуемый объем памяти. Если обозначить индексы каждого элемента как (i, j, k) ; $i, j = \overline{1, M}, k = \overline{1, M_{ij}}$, то значения четырех элементов (i, j, k) , (j, i, k) , $(i, j, M_{ij} - k)$, $(j, i, M_{ij} - k)$ равны (рис. 2, см. вторую сторону обложки).

Всего при подобном сокращении число элементов будет составлять

$$\sum_{i \geq j} \left\lceil \frac{M_{ij}}{2} \right\rceil, M_{ij} = \begin{cases} i + j - 1, & i + j - 1 \leq M; \\ 2M - i - j + 1, & i + j - 1 > M. \end{cases}$$

График отношения этого числа к M^3 представлен на рис. 3.

На графике видно, что это отношение стремится к $1/6$. Таким образом объем используемой памяти сокращается в 6 раз по сравнению с оригинальным методом.

4. Пример работы алгоритма для задач экономфизики

Обычно алгоритм применяется для решения задачи релаксации газа с возможностью получения промежуточных состояний между начальным и равновесным. Использование ядра столкновений из работы [10] с $\theta = 0$ позволяет применить алгоритм к моделям рынков [2–7], основанным на кинетической аналогии. Такие модели подразумевают соответствие частицам агентов на рынке, энергиям частиц — денежным средствам, активов каждого из агентов, взаимодействиям двух частиц — обменам между двумя агентами.

Для описания числа людей, обладающих определенными доходами (активами), приме-

няют распределение доходов $P(x)$, где $P(x)dx$ есть вероятность того, что в стационарном состоянии случайно выбранная персона могла бы иметь доход между x и $x + dx$. Описанный в работах [8–11] метод решения уравнения Больцмана имеет два важных отличия от методов, использованных в работах [2–7]. Первое — данный метод является детерминистическим, а не стохастическим. Второе — он позволяет получить значения функции распределения в моменты времени между начальным и равновесным распределениями. На рис. 4 показаны графики начального, конечного и нескольких промежуточных состояний функции распределения при моделировании так называемой ваучеризации в России в 90-е годы (такой процесс происходил и в некоторых других странах). Начальное распределение подразумевает $15 \cdot 10^7$ агентов, у каждого из которых есть 1 ваучер. Так что начальное распределение близко к "дельта-функции". Для описания данного рыночного процесса используется кинетическая аналогия взаимодействия частиц.

Таким образом, 150 000 000 ваучеров, каждый из которых соответствует доле в национальном богатстве, были равномерно распределены среди населения. Их можно было обменять на акции приватизируемых предприятий. Большинство людей быстро продали свои ваучеры за деньги. Большинство ваучеров в итоге приобреталось руководством предприятий. Мы можем оценить динамику этого кинетического процесса по официальным данным: известно, что каждый месяц проводилось 800 аукционов, т. е. 25 аукционов в день. Реальное число на сумму $\sim 10\,000$ ваучеров на 1 аукцион. Итак, 250 000 ваучер/день. Таким образом, в течение 1...3 лет все ваучеры ($1,5 \cdot 10^8$) находились на

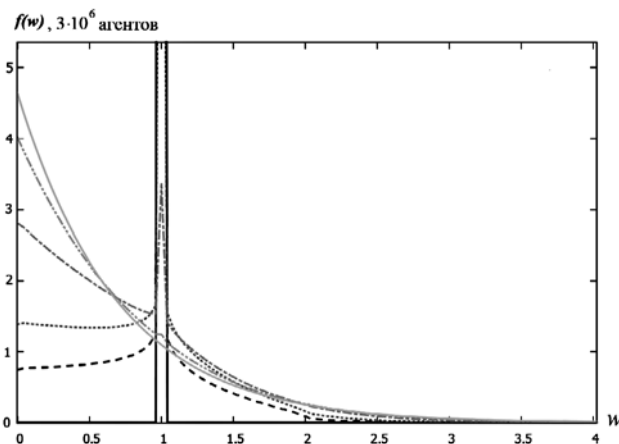


Рис. 4. Моделирование процесса ваучеризации

рынке или, в кинетических терминах, участвовали во взаимодействиях.

В течение этого периода времени процесс "релаксации" был завершен (в наших вычислениях мы использовали специальное масштабирование). Эффективная температура системы — соответствует "среднему богатству" и равна единице (соответствует 1 ваучеру, распределенному между всеми членами общества). Известно, что после завершения процесса большая часть населения не имела ваучеров, и расчеты подтвердили этот факт. На рис. 5 видно, что уже через 500 дней функция распределения близка к равновесной, причем большая часть агентов имеет очень мало ваучеров.

На рис. 5 показано стационарное распределение доходов населения для Аргентины 2002 г., которое принимается в качестве начального условия в задаче о релаксации (распределение взято из работы [2], стр. 159—167). Отметим, что, как указывается в работе [5], распределение доходов населения и распределение богатства тесно связаны (в частности, они могут зависеть линейно).

Неравновесное начальное распределение может быть сопоставлено с предполагаемым кризисным состоянием экономики (или во всяком случае, с экономикой, где существенны не только рыночные факторы). Процесс релаксации, основанный на уравнении Больцмана, показывает, как это кризисное распределение может быть переведено в равновесное распределение при введении рыночного механизма. В принципе, можно оценить и период такого гипотетического перехода.

В данной простой модели мы получили распределение Больцмана—Гиббса, фактически экспоненциальное (больцмановское) распределение ваучеров. Это следствие того, что в нашей модели ваучерная приватизация рас-

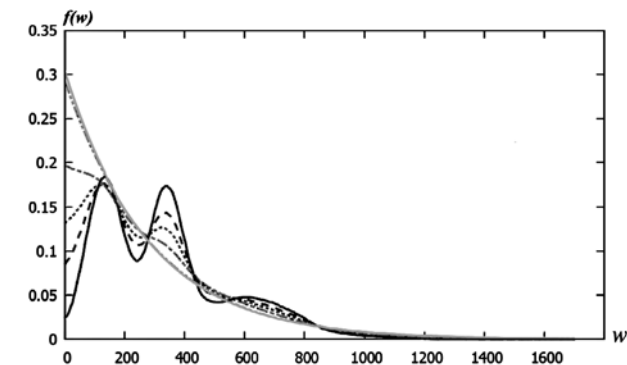


Рис. 5. Моделирование возможного влияния простого рынка на распределение доходов в Аргентине

считывается как примитивный процесс обмена без какого-нибудь сбережения (экономии) средств. Можно рассмотреть более сложную модель рынка с фиксированными множителями сохранения. При включении коэффициента сбережения распределение сдвигается от экспоненциального к распределению, соответствующему гамма-функции.

Начальное распределение из примера для Аргентины похоже на равновесное с коэффициентом сбережения, но с аномалиями: два пика вместо одного (и третий небольшой максимум) и ненулевое число агентов с нулевым числом активов. Для моделей с коэффициентом сбережения число агентов без активов стремится к нулю [2].

5. Сравнение объема используемых ресурсов

Значения для четырех вариантов программы: на процессоре/видеокарте и с оптимизацией памяти/без оптимизации совпадают. Различие только в используемых ресурсах. Программа была запущена во всех четырех конфигурациях для 128 ячеек энергии, для 256 ячеек и 512 ячеек энергии для 10 000 шагов по времени. В качестве однопоточного процессора был использован CPU Intel Core i5 8600K @ 4.68GHz. В качестве видеокарты был использован GPU Nvidia GeForce 1080Ti. Программа для видеокарты написана с использованием OpenCL. В табл. 1 приведены примерные объемы памяти, необходимые для работы программы с оптимизацией памяти и без нее.

Время работы программы на имеющемся оборудовании приведено в табл. 2. Возможны четыре конфигурации, обозначенные в таблице следующим образом:

- CPU/— — однопоточный алгоритм без оптимизации объема используемой памяти;
- GPU/— — параллельный алгоритм без оптимизации объема используемой памяти;
- CPU/+ — однопоточный алгоритм с оптимизацией объема используемой памяти;

Таблица 1
Примерные объемы необходимой памяти, Мбайт

Число ячеек	Без оптимизации	С оптимизацией
128	16	2,7
256	128	21,3
512	1000	170,7

Таблица 2

Время работы в разных конфигурациях, с

Число ячеек	CPU/–	GPU/–	CPU/+	GPU/+
128	13,38	0,096	43,506	0,088
256	95,277	0,531	340,26	1,84
512	705,18	3,01	2704,23	19,62

Таблица 3

Ускорение работы программы в разных конфигурациях

Число ячеек	$\frac{CPU/-}{GPU/-}$	$\frac{CPU/+}{GPU/+}$	$\frac{CPU/+}{CPU/-}$	$\frac{GPU/+}{GPU/-}$
128	139,375	494,39	3,25	0,917
256	179,43	184,92	3,57	3,47
512	234,28	137,83	3,83	6,51

GPU/+ — параллельный алгоритм с оптимизацией объема используемой памяти.

Можно определить, во сколько раз изменилась скорость работы алгоритма на имеющемся оборудовании.

Из табл. 3 видно, что для метода без оптимизации объема используемой памяти ускорение от распараллеливания увеличивается, но для метода с оптимизацией памяти ускорение уменьшается. Это связано с тем, что без оптимизации элементы $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$, считываемые соседними потоками видеокарты, находятся в соседних элементах памяти, что благодаря особенностям работы OpenCL позволяет этим потокам не ждать, пока другие считают из памяти нужные им элементы, а считывать их одновременно. С оптимизацией эта особенность частично утрачивается из-за невозможности эффективно использовать объединение памяти (memory coalescing), вследствие чего возникают большие задержки при обращении к элементам из несмежных участков памяти. Видно, что на вариант с оптимизацией объема используемой памяти уходит больше времени, чем на вариант без оптимизации. Это связано

Таблица 4

Ускорение работы программы в разных конфигурациях

Число ячеек	$\frac{CPU/-}{GPU/+}$
128	152,045
256	51,78
512	35,942

с тем, что с оптимизацией для получения нужного элемента $\hat{B}_{ij}^{k(\lambda)l(\lambda)}$ требуются дополнительные вычисления, чтобы найти место этого элемента в памяти. Без оптимизации дополнительные вычисления не нужны, так как каждый следующий элемент лежит в следующей ячейке памяти.

Несмотря на меньшее ускорение при переходе к параллельному алгоритму и замедление при оптимизации объема используемой памяти, алгоритм со всеми модификациями все равно оказывается значительно быстрее алгоритма, предложенного в работе [10], при этом используя почти в 6 раз меньше памяти (табл. 4).

Таким образом, предложенный алгоритм может использоваться для более быстрых вычислений с меньшей погрешностью, благодаря более частому делению пространства энергий на ячейки.

Заключение

Предложенные алгоритмы для решения уравнения Больцмана детерминистическим методом позволяют при наличии подходящего оборудования ускорить вычисления по крайней мере на два порядка, либо на порядок, но с уменьшением количества требуемой памяти до шести раз.

Также сделаны первые шаги для применения детерминистического метода решения уравнения Больцмана в однородном изотропном случае к задачам моделирования рынков аналогично методам эконофизики. Важным отличием описанного метода является возможность задать неравновесное распределение и проследить эволюцию идеального рынка к равновесному состоянию в различные моменты времени.

Список литературы

1. Коган М. Н. Динамика разреженного газа. М.: Наука, 1967. 440 с.
2. Chatterjee A., Yarlagaadda S., Chakrabarti B. K. Econophysics of Wealth Distributions. Springer Verlag, Milan, 2005. 248 с.
3. Chakrabarti K., Chakraborti A., Chakravarty S. R., Chatterjee A. Econophysics of Income and Wealth Distributions. Cambridge University Press, Cambridge, 2013. 222 с.
4. Dragulescu A. A., Yakovenko V. M. Exponential and power-law probability distributions of wealth and income in the United Kingdom and the United States // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2001. Vol.299. P. 213–221.
5. Dragulescu A., Yakovenko V. M. Statistical mechanics of money // Eur. Phys. J. B. 2000. Vol. 17, Iss. 4. P. 723–729.

6. **Angle J.** Deriving the size distribution of personal wealth from "the rich get richer, the poor get poorer" // *Journal of Mathematical Sociology*. 1993. Vol. 18. P. 27–46.
7. **Cordier S., Pareschi L., Toscani G.** On a Kinetic Model for a Simple Market Economy // *Journal of Statistical Physics*. 2005. Vol. 120. P. 253–277.
8. **Аристов В. В.** О решении уравнения Больцмана для дискретных скоростей // *Докл АН СССР*. 1985. Т. 283, № 4. С. 831–834.
9. **Aristov V. V.** Direct methods for solving the Boltzmann equation and study of nonequilibrium flows. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
10. **Asinari P.** Nonlinear Boltzmann equation for the homogeneous isotropic case: Minimal deterministic Matlab program // *Computer Physics Communications*. 2010. Vol. 181. P. 1776–1788.

11. **Аристов В. В., Забелок С. А.** Детерминистический метод решения уравнения Больцмана с параллельными вычислениями // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 2002. Т. 42, № 3. С. 325–336.
12. **Alekseenko A., Josyla E.** Deterministic solution of the spatially homogeneous Boltzmann equation using discontinuous Galerkin discretizations in the velocity space // *Journal of Computational Physics*. 2014. Vol. 272. P. 170–188.
13. **Malkov E. A., Ivanov M. S.** Parallelization of algorithms for solving the Boltzmann equation for GPU-based computations // *AIP Conf. Proc.* 2011. Vol. 1333. P. 946–951.
14. **Малков Е. А., Иванов М. С.** Детерминированный метод частиц-в-ячейках для решения задач динамики разреженного газа. Часть I // *Вычислительные методы и программирование*. 2011. Т. 12, № 3. С. 368–374.

A. A. Aristov, Professor, Chief Researcher, e-mail: aristovvl@yandex.ru,
Institution of Russian Academy of Sciences Dorodnicyn Computing Centre of RAS,
MIREA — Russian Technological University,
A. V. Stroganov, Assistant Professor, e-mail: savthe@gmail.com,
A. D. Yastrebov, PhD Student, e-mail: andr.yast711@gmail.com,
MIREA — Russian Technological University

Development of a Parallel Deterministic Method of Solving the Boltzmann Equation and its Application Using OpenCL

We propose an optimized algorithm for deterministic method of solving the Boltzmann kinetic equation using parallel computation. We show the examples of application of proposed algorithm for solving economic problem of wealth distribution. Utilization of time and memory resources is discussed and compared to the method described in the previous works. We show that proposed algorithm is useful for solving the kinetic problems.

Keywords: Boltzmann equation, deterministic method, econophysics, parallel computations, OpenCL

DOI: 10.17587/it.26.266-273

References

1. **Kogan M. N.** Rarefied gas dynamics, Moscow, Nauka, 1967, 440 p. (in Russian).
2. **Chatterjee A., Yarlagadda S., Chakrabarti B. K.** Econophysics of Wealth Distributions, Springer Verlag, Milan, 2005, 248 p.
3. **Chakrabarti K., Chakraborti A., Chakravarty S. R., Chatterjee A.** Econophysics of Income and Wealth Distributions, Cambridge, Cambridge University Press, 2013, 222 p.
4. **Dragulescu A. A., Yakovenko V. M.** Exponential and power-law probability distributions of wealth and income in the United Kingdom and the United States, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2001, vol. 299, pp. 213–221.
5. **Dragulescu A., Yakovenko V. M.** Statistical mechanics of money, *Eur. Phys. J. B*, 2000, vol. 17, iss. 4, pp. 723–729.
6. **Angle J.** Deriving the size distribution of personal wealth from "the rich get richer, the poor get poorer", *Journal of Mathematical Sociology*, 1993, vol. 18, pp. 27–46.
7. **Cordier S., Pareschi L., Toscani G.** On a Kinetic Model for a Simple Market Economy, *Journal of Statistical Physics*, 2005, vol. 120, pp. 253–277.
8. **Aristov V. V.** *Doklady Mathematics USSR*, 1985, vol. 283, no. 4, pp. 831–834 (in Russian).
9. **Aristov V. V.** Direct methods for solving the Boltzmann equation and study of nonequilibrium flows, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001.
10. **Asinari P.** Nonlinear Boltzmann equation for the homogeneous isotropic case: Minimal deterministic Matlab program, *Computer Physics Communications*, 2010, vol. 181, pp. 1776–1788.
11. **Aristov V. V., Zabelok S. A.** *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2002, vol. 42, no. 3, pp. 325–336 (in Russian).
12. **Alekseenko A., Josyla E.** Deterministic solution of the spatially homogeneous Boltzmann equation using discontinuous Galerkin discretizations in the velocity space, *Journal of Computational Physics*, 2014, vol. 272, pp. 170–188.
13. **Malkov E. A., Ivanov M. S.** Parallelization of algorithms for solving the Boltzmann equation for GPU-based computations, *AIP Conf. Proc.*, 2011, vol. 1333, pp. 946–951.
14. **Malkov E. A., Ivanov M. S.** *Numerical methods and programming*. 2011, vol. 12, no. 3, pp. 368–374 (in Russian).

Т. М. Волосатова, канд. техн. наук, доц., tamaravol@gmail.com,
МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва,
А. В. Козов, инженер, alexey.kozov@gmail.com, **А. А. Тачков**, канд. техн. наук,
нач. отдела "Автоматизированные транспортные системы", tachkov@bmstu.ru,
НУЦ "Робототехника", МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва

Система группового управления мобильными роботами с позиций автоматизированного проектирования

Исследованы особенности процесса проектирования системы управления группой мобильных робототехнических комплексов, действующих в недетерминированной изменяющейся среде. Рассмотрен пример использования группы роботов для тушения пожара на объекте нефтегазового комплекса. Проведен анализ свойств системы группового управления, показано, что подобную систему необходимо рассматривать как динамически реконфигурируемую иерархическую дискретно-событийную систему, распределенную в пространстве. Отмеченные свойства рассмотрены с точки зрения задачи проектирования и реализации системы группового управления. Указаны особенности системы группового управления как объекта проектирования, отмечена возможность вертикальной и горизонтальной декомпозиции задачи проектирования, представлены методы синтеза и существующие программные инструменты. Проведенный анализ выявил необходимость автоматизации процесса проектирования программно-алгоритмического обеспечения систем группового управления. Описаны проектные процедуры синтеза и возможности их упрощения с помощью таких методов программной инженерии, как формальная верификация программного обеспечения и предметно-ориентированные языки. Сформулированы задачи специализированной системы автоматизированного проектирования программно-алгоритмического обеспечения системы группового управления мобильными робототехническими комплексами. Указаны направления развития данной работы.

Ключевые слова: система управления, групповое управление, распределенная система, дискретно-событийная система, динамическая реконфигурация, программно-алгоритмическое обеспечение, мобильный робот, автоматизация проектирования

Введение

Мобильные робототехнические комплексы (МРТК) находят сегодня практическое применение в областях, связанных с повышенной опасностью для жизни человека. МРТК активно используются при тушении пожаров, ликвидации последствий природных и техногенных катастроф, в аэрокосмической и военной областях. Расширение тактических возможностей робототехнических комплексов возможно путем объединения нескольких МРТК (автономных агентов) для совместной работы в группе [1]. Применение группы роботов, особенно в недетерминированной изменяющейся среде, существенно повышает предъявляемые к системе управления требования. Система группового управления (СГУ) должна не только обеспечивать согласование действий роботов для выпол-

нения задачи с требуемой эффективностью, но и поддерживать взаимодействие с человеком-оператором, осуществляющим контроль действий группы, а также своевременно реагировать на изменения окружающей обстановки.

Несмотря на имеющийся сегодня обширный методологический задел в области группового управления практическое применение методов и алгоритмов существенно ограничено из-за сложности описания группы МРТК как объекта управления, а СГУ — как объекта проектирования. Различным подходам к проектированию СГУ посвящено большое число работ (например, [2–5]), в которых, однако, почти не затронуты вопросы автоматизации предлагаемых проектных процедур. Актуальной научной задачей является анализ свойств СГУ как объекта проектирования и особенностей процесса разработки подобных систем для формализа-

ции задач автоматизации проектирования СГУ. Данная статья развивает положения работы [6], в которой были кратко изложены некоторые аспекты указанной научной задачи.

Рассмотрим ситуацию применения гетерогенной группы МРТК в недетерминированной изменяющейся среде, например, при ликвидации пожара на объекте нефтегазового комплекса (в резервуарном парке). Действия гетерогенной группы МРТК следует рассматривать как упорядоченную последовательность взаимосвязанных действий, направленных на достижение поставленной цели (локализации и ликвидации очага пожара), — *операцию* [7]. Ресурсами операции являются функциональные возможности отдельных МРТК. Человек-оператор организует *групповую операцию*, комбинируя заранее заданные *групповые действия* (движение подгруппы по траектории, выход на рубеж) с помощью специального программного обеспечения, основанного на возможностях геоинформационной системы [8]. На рис. 1 (см вторую сторону обложки) представлен пример групповой операции: МРТК группы следуют со стартовой позиции 1 по траектории 2 до рубежа 3, где они должны образовать две подгруппы, проследовать по траекториям 4, 5 и на рубежах 6, 7 приступить к тушению пожара. Определяющая групповую операцию последовательность действий должна быть привязана не только к координатам места выполнения, но и ко времени, поэтому ее можно представить в виде сетевого графика.

В рамках рассмотренного примера введем следующие ограничения: все возможные групповые действия должны быть определены на этапе проектирования СГУ, а каждая подгруппа в любой момент времени может выполнять только одно групповое действие. Групповое действие представляет собой комбинацию *индивидуальных действий* МРТК, которые, в свою очередь, состоят из согласованных действий различных подсистем робота. Реализация составляющих операцию действий в рамках СГУ происходит путем решения информационно-расчетных задач (ИРЗ): обработки сигналов сенсорных систем, передачи и обработки управляющих команд, запуска и прерывания других ИРЗ.

Свойства системы группового управления

Выделим основные иерархические уровни СГУ по их функциональному назначению (рис. 2). Верхний уровень СГУ реализует функ-

А уровень формирования операции
Б уровень управления подгруппой МРТК
В уровень управления единичным МРТК
Г уровень управления подсистемой МРТК
Д уровень управления исполнительным устройством

Рис. 2. Иерархия уровней системы группового управления

ции приема и разбора задачи групповой операции для трансляции ее нижележащим уровням, контроля выполнения операции и оперативно-го, возможно интерактивного, взаимодействия с человеком-оператором. Обратим внимание, что данный уровень не включает задачи взаимодействия с отдельным МРТК группы. Следующий уровень осуществляет контроль выполнения групповых действий, управление созданием и разделением подгрупп при выполнении операции, а также распределением индивидуальных действий между участниками подгруппы. Уровень управления единичным МРТК реализует функции контроля выполнения индивидуальных действий и отслеживания состояния МРТК. Системы управления подсистемами МРТК и его исполнительными устройствами соответствуют нижним уровням СГУ. В настоящее время среди специалистов в области робототехники отсутствует устоявшаяся терминология для обозначения каждого из уровней. В данной работе использованы следующие обозначения (рис. 2): уровень формирования операции (**А**), уровень управления подгруппой (**Б**), уровень управления единичным роботом (**В**), уровень управления подсистемой МРТК (**Г**), уровень управления исполнительным устройством (**Д**). Системы управления на всех перечисленных уровнях, кроме нижних, являются системами логического управления, реализующими закладываемые проектантами СГУ алгоритмы работы.

Подгруппа МРТК, соответствующая объекту управления на уровне **Б**, содержит от 1 до *N* роботов, где *N* — общее число МРТК в группе. Такой объект управления, в некотором смысле виртуальный, возникает при выполнении групповой операции. В процессе выполнения он может изменять свою структуру (число и тип

роботов в подгруппе, связи между ними), а после завершения операции прекращает свое существование. Введение этого уровня позволяет упростить задачу управления всей группой: состояние подгруппы заменяет параллельную композицию состояний роботов подгруппы. Система управления уровня А оперирует системой подгрупп ("группой подгрупп"), которая имеет существенно меньшую размерность по сравнению с системой всех МРТК группы. Подобная вертикальная декомпозиция СГУ соответствует способу формирования операции из отдельных подзадач (движение заданным строем, разведка в некоторой области и т.п.) вместо непосредственного управления отдельными роботами, что позволяет упростить работу человека-оператора группы и снизить психофизическую нагрузку [8, 9]. Выделение подгрупп как отдельных объектов управления соответствует принципу иерархической многоуровневой организации системы. Каждый уровень предоставляет вышестоящему набор сервисов и использует сервисы нижележащего, а коммуникация осуществляется по интерфейсам межуровневого взаимодействия между соседними в иерархическом плане уровнями [10].

При управлении группой МРТК (прежде всего, специального назначения) к каждому уровню СГУ и к системе в целом предъявляются повышенные требования по быстродействию, надежности, отказоустойчивости, живучести и безопасности. Система должна функционировать и обеспечить выполнение поставленных целей в условиях выхода из строя членов группы, нарушения работы каналов связи или активного противодействия. Цена ошибки СГУ может быть особенно высока при управлении группой МРТК среднего и тяжелого классов, действующих в условиях, представляющих опасность жизни человека.

Для управления группой роботов (уровни А, Б на рис. 2) предложено большое число подходов: коллективное, стайное, сетевое управление, мультиагентный подход, применение нейронных сетей и нечеткой логики [2, 11–13]. С точки зрения задач синхронизации действий отдельных подгрупп и взаимодействия с человеком-оператором группу МРТК можно рассматривать как дискретно-событийную систему. Процесс функционирования такой системы представляет собой последовательность событий, вызывающих изменение состояния объекта управления. Источниками событий могут быть объект управления, СГУ, внешняя среда или надсистема, а в промежутке между двумя после-

довательно возникшими событиями состояние системы считается неизменным [14].

Существующие подходы к управлению дискретно-событийными системами используют представление поведения системы в виде сетей Петри различных видов (временные, ингибиторные, цветные и др.) или сводимых к ним моделей. Поэтому целесообразно использовать сводимые к сетям Петри модели, в частности, конечные автоматы и конечноавтоматные сети, для задания требуемого поведения объекта управления (формальной спецификации K). В зависимости от рассматриваемого иерархического уровня СГУ спецификация может быть получена как результат формализации групповой операции, группового или индивидуального действия. На уровне Б подобная формализация должна включать протоколы обмена информацией между членами подгруппы и компонентами СГУ, необходимые для формирования внутреннего представления МРТК о внешней среде [15]. Отметим, что спецификация задает формальные требования к результату функционирования системы, а их реализацию обеспечивает система управления.

Имеющее широкое распространение супервизорное управление [16] рассматривает объект управления как генератор G некоторого формального языка $L(G)$, а спецификацию K — как подмножество этого формального языка $K \subseteq L(G)$. Алфавит $L(G)$ составляет множество E событий системы, разбитое на два непересекающихся подмножества: подмножество неуправляемых событий E_{uc} и подмножество управляемых событий E_c . Задана модель ничем не ограниченного объекта управления G и спецификация K как ограничения на его поведение. Супервизор S встроен в контур обратной связи по определенным правилам [17]. Он всегда допускает события из множества E_{uc} и может допускать или не допускать (блокировать) события из множества E_c так, чтобы поведение системы из супервизора и объекта управления удовлетворяло бы K . Модель объекта управления и спецификация могут быть заданы в виде детерминированных конечных автоматов или сетей Петри.

Однако для применения данного подхода в разработке верхних уровней СГУ МРТК необходимо учитывать ряд особенностей. Недетерминированность внешней среды означает, что спецификация должна включать различные варианты поведения в зависимости от ситуации и, возможно, изменяться непосредственно во время выполнения групповой

операции. Структура и функциональные возможности объекта управления в процессе выполнения групповой операции также могут изменяться, что означает изменение языка $L(G)$. Это происходит, например, при добавлении нового робота в группу, объединении или выделении новых подгрупп. Таким образом, при применении супервизорного управления следует учитывать, что группа МРТК как объект управления обладает переменной структурой.

Наложим на объект управления переменной структуры следующее ограничение [18]. Изменение внутренней структуры в процессе функционирования объекта управления происходит за время t_i^R , значительно меньшее времени t_i^A и t_{i+1}^A выполнения основных действий i и $i + 1$ (групповых действий на уровне **A**, индивидуальных действий на уровне **B**), между которыми произошло изменение структуры

$$t_i^R \ll \min(t_i^A, t_{i+1}^A), i = 1, 2, \dots, m - 1,$$

где $m \geq 2$ — число действий, выполняемых объектом управления.

Рассмотрим ситуацию изменения структуры объекта управления на уровне **B**. Синтез алгоритма работы системы управления этого уровня происходит по формальной спецификации K группового действия и модели объекта управления (подгруппы МРТК) $L(G)$. Если изменение структуры объекта управления происходит *во время* выполнения группового действия, то для соблюдения спецификации K необходимо изменение модели $L(G)$ и алгоритма работы системы управления. Алгоритм работы представляет собой последовательность ИРЗ — проводимых компьютером операций над данными (изменение, получение, отправка членам группы) и может быть представлен вычислительным графом $\langle A, C \rangle$. Множество $A = \{a_i\}$, $i = 1, 2, \dots, |A|$, где $|A|$ — мощность множества A , составляют вершины графа, которые соответствуют операторам алгоритма, связанным с выполнением индивидуальных действий. Множество дуг $C = \{c_{i,j}\}$, $i = 1, 2, \dots, |A|$, $j = 1, 2, \dots, |A|$, $i \neq j$, задает информационные связи между операторами алгоритма. Неравенство $c_{i,j} \neq 0$ означает наличие информационной связи между операторами a_i и a_j , $c_{i,j} = 0$ — ее отсутствие. Так, добавление нового МРТК в подгруппу во время выполнения некоторого группового действия должно быть отражено в модели объекта управления и потребует изменения системы управления: в вычислительный граф

алгоритма ее работы для соблюдения спецификации будут добавлены новые операторы и информационные связи между ними. Таким образом, должна быть проведена *динамическая реконфигурация* системы управления, что соответствует принципу адаптивного управления.

Изменение структуры объекта управления на уровне **A** во время выполнения операции, например создание новой подгруппы, аналогичным образом ведет к необходимости динамической реконфигурации системы управления этого уровня. Однако стоит заметить, что спецификация на уровне **A** может содержать требования по распределению ресурсов. В таком случае СГУ должна решать задачи управления ресурсами, а дуги графа групповой операции приобретают смысл ресурсных связей между составляющими операцией групповыми действиями.

Обеспечить соответствие модели объекту управления при изменении его структуры возможно путем параметризации структуры, формирования метамодели (т.е. включения в модель предполагаемых изменений) или коррекции модели экспертом — человеком-оператором, автоматизированной или автоматической системой. Параметризация структуры модели (например, числа МРТК в группе) может быть эффективно применена в случаях, когда обновление значений параметров позволит отразить изменения структуры объекта управления. Включение в модель различных вариантов структуры объекта управления ведет к существенному усложнению системы управления, использующей такую модель, и к экспоненциальному росту сложности задачи ее синтеза. Коррекция модели экспертом непосредственно в процессе функционирования требует решения проблем оперативного доведения изменений до системы управления соответствующего уровня. Аналогичные подходы могут быть использованы для коррекции спецификации K при изменении внешней среды (условий применения группы).

Таким образом, систему управления группой МРТК, учитывая перечисленные особенности, следует рассматривать как динамически реконфигурируемую иерархическую дискретно-событийную систему, распределенную в пространстве.

Проектирование системы группового управления

При проектировании СГУ необходимо учитывать, что группа МРТК представляет со-

бой целеустремленную техническую систему (ЦУТС). Задача СГУ состоит в управлении группой таким образом, чтобы достичь заданных целей операции с учетом ограничений по ресурсам и времени. Подсистемы различных иерархических уровней выступают в качестве обеспечивающих ЦУТС [7]. При проектировании таких систем управления необходимо исходить из того, что их основная задача — обеспечение функционирования соответствующих уровней с требуемыми показателями качества.

Рассмотренные ранее особенности верхних уровней СГУ, связанные с изменением вычислительного графа алгоритма работы, указывают на возможность использования некоторых положений теории реконфигурируемых распределенных вычислительных систем (многопроцессорных вычислительных систем на основе реконфигурируемой элементной базы) [18–20]. Заметим, в случае управления группой МРТК компоненты системы не только распределены в пространстве, но и подвижны (мобильны). Задачу проектирования такой системы на каждом уровне иерархии следует разбивать на подзадачи, связанные с разработкой отдельных компонентов (модулей) и интерфейсов их взаимодействия, реализуя тем самым горизонтальную декомпозицию СГУ. Модули системы должны функционировать под управлением разных операционных систем на различных аппаратных платформах: встраиваемых микропроцессорных системах, бортовых вычислителях МРТК, компьютерах пункта управления и автоматизированного рабочего места человека-оператора. Следствием этого является требование кроссплатформенности и портируемости программных компонентов СГУ.

Разработка подсистем разных уровней ведется в общем случае разными проектантами с использованием различного инструментария, поэтому одна из задач проектирования СГУ — обеспечение согласованности и возможности взаимодействия подсистем между собой, с над- и подсистемами. Поскольку СГУ является распределенной информационной системой, взаимодействие ее компонентов должно происходить согласно заданному протоколу или иному формальному описанию интерфейса компонентов системы. Один из подходов к проектированию подобных систем представлен в работе [10].

Теория супервизорного управления позволяет провести автоматический синтез системы логического управления по спецификации поведения K и модели объекта управления $L(G)$ [21]. Супервизорное управление применяют при

проектировании систем управления группами промышленных роботов, где объект управления неизменен, а спецификация поведения системы задана технологическим процессом. Принципиальное отличие разработки рассматриваемого в настоящей работе класса СГУ состоит в том, что на этапе проектирования должен быть разработан набор правил преобразования $K(X)$ некоторого множества аргументов X , таких как, например, число роботов в подгруппе или координаты точек траектории движения. Спецификация K будет результатом применения $K(X)$ к конкретным значениям аргументов, которые будут получены только после постановки цели операции и могут изменяться в процессе ее выполнения. Обратим внимание, что в рамках описанной иерархической системы модель $L(G)$ может быть сформирована на основе спецификации поведения нижележащего уровня и множества команд вышестоящего уровня. Следовательно, разработка правил и алгоритмов формирования спецификаций поведения является одной из ключевых задач проектирования верхних уровней СГУ.

Одним из основных факторов, ограничивающих практическое применение теории супервизорного управления, является проблема размерности пространства состояний системы [22, 23]. Для верхних уровней СГУ эта проблема имеет наибольшую актуальность. При проектировании этих уровней необходимо принимать во внимание изменения как структуры модели объекта управления, так и спецификации поведения, что ведет к созданию метамodelей большой размерности. Для борьбы с проблемой размерности ("взрыва состояний") используют методы декомпозиции системы, например, методы модульного синтеза супервизора и структурирования событий [24].

Существующие инструменты предоставляют возможности дискретно-событийного моделирования работы модулей верхних уровней СГУ [25]. Однако следует подчеркнуть важность выбора инструментов моделирования, поскольку имеющиеся у различных инструментов ограничения могут оказать влияние на характеристики полученных с их помощью моделей. Наиболее широкий выбор существует среди инструментов моделирования, автоматизации проектирования, программной и аппаратной реализации модулей нижних уровней СГУ. При разработке с использованием таких инструментов, как *MATLAB-Simulink* или *LabVIEW*, проектант имеет возможность не только разрабатывать и верифицировать раз-

личные алгоритмы и модели, но и автоматически генерировать реализующий соответствующую функциональность программный код для встраиваемых систем [26]. Такая возможность позволяет существенно ускорить процесс разработки компонентов систем управления нижних уровней. Для упрощения разработки компонентов среднего и верхнего уровней часто применяют предоставляемые средой *Robot Operating System (ROS)* инструментарий, интерфейсы взаимодействия, библиотеки базовых блоков и готовых решений. Для автоматизации процесса тестирования и отладки *ROS*-приложений могут быть использованы специальные стенды [27]. Таким образом, существуют инструменты как для моделирования компонентов верхних уровней СГУ, так и для их реализации. Однако из-за отсутствия возможности автоматического преобразования разработанной модели в формальное описание, комплект проектной документации и удовлетворяющую поставленным требованиям систему управления процесс подобного преобразования при проектировании компонентов верхних уровней СГУ представляет наибольшую сложность.

Задачу разработки верхних уровней СГУ с учетом указанных особенностей необходимо рассматривать как задачу проектирования иерархической распределенной кроссплатформенной модульной системы. Ключевое значение имеет проблема перевода замысла проектанта в формальную спецификацию поведения компонентов СГУ, т.е. разработка *программно-алгоритмического обеспечения* этой системы. Снижение очевидной сложности и упрощение процессов разработки спецификаций, синтеза и моделирования компонентов СГУ возможно путем применения подходов инженерии программного обеспечения и специализированной системы автоматизированного проектирования (САПР).

Автоматизация проектных процедур

Обеспечение качества и повышение надежности разрабатываемого программно-алгоритмического обеспечения возможно благодаря применению в САПР формальных методов валидации и верификации. Формальная верификация программного обеспечения, например с помощью проверки моделей (англ. *model checking*), позволяет доказать, что программная система не содержит некоторых ошибок, удов-

летворяет заданным требованиям и обладает определенными свойствами [28].

Предметно-ориентированные языки (англ. *DSL, domain-specific language*) позволяют существенно упростить и ускорить разработку за счет абстрагирования от реализации и высокой декларативности [29]. Специальные *DLS*, в том числе визуальные, целесообразно применять для наиболее трудоемких задач работы со спецификациями поведения, поэтому САПР должна поддерживать набор специальных предметно-ориентированных языков и инструментов метапрограммирования.

Специализированная САПР верхних уровней СГУ должна обладать инструментами для работы с сетями Петри различных видов и сетями конечных автоматов. Другими необходимыми элементами являются подсистемы моделирования и синтеза. Отметим, что некоторые существующие инструменты моделирования общего назначения позволяют преобразовать разработанную с их помощью модель в программный код на языках высокого уровня, который может быть использован в действующей системе управления. Однако следует учитывать, что модели могут получать различные "артефакты" вследствие ограничений инструмента, поэтому автоматическое преобразование не всегда целесообразно, а ручное изменение полученного кода не всегда возможно. По этой причине разработку обычно выполняют итеративно в несколько этапов: разработка модели, ее тестирование и отладка, реализация системы управления согласно модели, тестирование и отладка реализованной системы, коррекция модели и итеративное повторение цикла разработки до получения результата с требуемыми параметрами. Альтернативой описанной проектной процедуре является применение теории супервизорного управления. После разработки спецификации поведения компонента системы, например в виде сети Петри, следует синтез супервизора и модели, описывающей супервизор и объект управления, для верификации. Верификация и всестороннее тестирование поведения модели позволяют сделать вывод о необходимости коррекции спецификации или о готовности синтезированного компонента системы к интеграции в СГУ. Одним из тестов для модулей верхних уровней СГУ должна быть проверка совместной работы, в том числе с имитацией нарушений работы каналов связи между модулями. Разработанная в НУЦ "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана система *LOCOL* частично реализует описанный подход

[30]. Однако применение этого инструмента при разработке систем управления МРТК ограничено программно-аппаратными требованиями синтезированной системы.

На основе проведенного анализа перечислим задачи проектирования верхних уровней (А, Б, В) СГУ МРТК, упрощение которых возможно с помощью САПР:

- разработка спецификаций поведения и правил их формирования после постановки цели операции;
- обеспечение возможности изменения объекта управления или поставленной цели непосредственно в процессе ее выполнения;
- разработка протоколов межуровневого и межкомпонентного взаимодействия, обеспечение их согласованности и соблюдения различными модулями;
- учет в программно-алгоритмическом обеспечении возможного нарушения работы каналов связи при выполнении групповой операции;
- обеспечение заданных показателей качества программного обеспечения;
- синтез компонентов системы управления.

Комплексность и разнородность перечисленных задач, а также отсутствие готовых инструментов для их решения в рамках единой системы свидетельствуют о необходимости создания специализированной САПР программно-алгоритмического обеспечения СГУ.

Заключение

Актуальность проблем разработки систем управления группами МРТК связана со все более широким распространением и возрастающей сложностью систем данного класса. Анализ группы МРТК как объекта управления показывает, что сложность процесса разработки СГУ связана с такими свойствами системы, как иерархичность, наличие переменной структуры, высокие требуемые показатели качества функционирования, высокая размерность пространства состояний верхних уровней системы. Несмотря на имеющийся теоретический базис существует проблема перевода замысла проектанта в формальную спецификацию поведения компонентов СГУ. Особенности проектирования СГУ, низкий уровень автоматизации проектных процедур и отсутствие готовых инструментов указывают на объективную необходимость создания специализированной САПР программно-алго-

ритмического обеспечения СГУ МРТК. Проведенный в данной работе анализ позволил сформулировать задачи такой САПР и обозначить подходы к их решению. Развитие работы планируется в направлениях анализа и формализации ключевых проблем проектирования СГУ, а также разработки методов и программных средств автоматизации проектирования дискретно-событийных систем переменной структуры.

Список литературы

1. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 280 с.
2. Белоглазов Д. А. и др. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В. Х. Пшихопова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 305 с.
3. Манько С. В., Диане С. А.К., Лохин В. М., Романов М. П. Модели и программно-алгоритмическое обеспечение мультиагентных робототехнических систем // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. Т. 1, № 3. С. 166—191.
4. Mu B., Chen J., Shi Y., Chang Y. Design and Implementation of Nonuniform Sampling Cooperative Control on a Group of Two-Wheeled Mobile Robots // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 64, N. 6. P. 5035—5044.
5. Hu X., Zeigler B. P., Mittal S. Variable Structure in DEVS Component-Based Modeling and Simulation // Simulation. 2005. Vol. 81, N. 2. P. 91—102.
6. Козов А. В., Волосатова Т. М., Тачков А. А. Направления автоматизации проектирования систем управления группами мобильных роботов // Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем. Елец, 2019. С. 335—339.
7. Петухов Г. Б., Якунин В. И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М.: АСТ, 2006. 504 с.
8. Максимов А. А., Тачков А. А., Малыхин А. Ю., Рудянов Н. А. Подход к формализации тактической задачи для группы наземных робототехнических комплексов военного назначения // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 7—8. С. 88—96.
9. Лысенко И. В. Оценивание эффективности функционирования человеко-машинных систем: вероятностный подход // Труды СПИИРАН. 2002. Т. 1, № 1. С. 49—64.
10. Апраксин Ю. К. Управление информационным взаимодействием в распределенных технических системах. Конечно-автоматный подход. М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. 182 с.
11. Щербатов И. А., Проталинский И. О., Проталинский О. М. Управление группой роботов: компонентный подход // Информатика и системы управления. 2015. Т. 43, № 1. С. 93—104.
12. Karpenko A. P., Leshchey I. A. Nature-Inspired Algorithms for Global Optimization in Group Robotics Problems // Smart Electromechanical Systems: Group Interaction. Cham, 2019. P. 91—106.
13. Hüttenrauch M., Šošić A., Neumann G. Deep Reinforcement Learning for Swarm Systems // Journal of Machine Learning Research. 2019. Vol. 20, N. 54. P. 1—31.

14. **Wonham W. M., Cai K.** Supervisory Control of Discrete-Event Systems. Cham: Springer, 2018. 502 p.
15. **Zeigler B. P.** Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models: Intelligent Agents and Endomorphic Systems. Academic Press, 1990, 397 p.
16. **Wonham W. M., Cai K., Rudie K.** Supervisory Control of Discrete-Event Systems: A Brief History // Annual Reviews in Control. 2018. Vol. 45. P. 250—256.
17. **Амбарцумян А. А.** Сетевое управление на сетях Петри в структурированной дискретно-событийной системе // Управление большими системами. 2010. Вып. 30.1. С. 506—535.
18. **Филиппов А. К.** Теоретические основы проектирования динамически реконфигурируемых систем обработки информации: учебное пособие. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. 119 с.
19. **Каляев И. А., Левин И. И.** Высокопроизводительные модульно-наращиваемые многопроцессорные системы на основе реконфигурируемой элементной базы // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2007. Т. 8, № 2. С. 24—33.
20. **Карпенко А. П., Чернецов С. А.** Балансировка загрузки распределенной гетерогенной вычислительной системы средствами GRID при распараллеливании одного класса задач // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электронный журнал. 2008. № 11. С. 1—10.
21. **Wonham W. M., Ramadge P. J.** Modular Supervisory Control of Discrete-Event Systems // Mathematics of Control, Signals and Systems. 1988. Vol. 1, N. 1. P. 13—30.
22. **Амбарцумян А. А., Томилин Е. Е.** Метод прямого синтеза супервизора для структурированной дискретно-динамической системы // Автоматика и телемеханика. 2010. № 8. С. 168—188.
23. **Zaytoon J., Riera B.** Synthesis and Implementation of Logic Controllers — A Review // Annual Reviews in Control. 2017. Vol. 43. P. 152—168.
24. **Амбарцумян А. А.** Супервизорное управление структурированными динамическими дискретно-событийными системами // Автоматика и телемеханика. 2009. № 8. С. 156—176.
25. **Алексеев В. А., Яковлев Д. С., Тачков А. А.** Моделирование иерархической системы управления группой наземных робототехнических средств // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 4. С. 1—20.
26. **Krizan J., Ertl L., Bradac M., Jasansky M., Andreev A.** Automatic Code Generation from Matlab/Simulink for Critical Applications // 2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). Toronto, 2014. P. 1—6.
27. **Тачков А. А., Вукотов А. Ю., Козов А. В.** Особенности портирования Robot Operating System на программно-аппаратную платформу семейства "Эльбрус" // Программные продукты и системы. 2019. Т. 32, № 4. С. 655—664.
28. **Кларк Э. М., Грамберг О., Пелед Д.** Верификация моделей программ: Model checking. М.: МЦНМО, 2002. 416 с.
29. **Фаулер М.** Предметно-ориентированные языки программирования. М.: Вильямс, 2011. 572 с.
30. **Максимов А. А.** Один подход к построению конечно-автоматной управляющей сети // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2012. № 6. С. 14—29.

T. M. Volosatova, Ph.D., Associate Professor, e-mail: tamaravol@gmail.com,
CAD System Department, Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russian Federation,

A. V. Kozov, Engineer, e-mail: alexey.kozov@gmail.com,
A. A. Tachkov, Ph.D., Head of the Department "Automated transport systems", e-mail: tachkov@bmstu.ru
Science and Educational Center "Robotics" Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105037, Russian Federation

The Control System for a Group of Mobile Robots from the Perspectives of Automated Designing

This paper is devoted to the features of the design process of a control system for a group of mobile robots. We considered group of mobile robots operated in a non-deterministic changing environment. Firefighting operations in oil and gas complex are given as example of such group using. The features of the group control system are considered in paper. It is shown that the group control system has to be considered as a dynamically reconfigurable hierarchical discrete-event distributed system. These properties are analyzed in terms of designing and implementing a group control system. The features of a group control system as a designing object are described, as well as the possibility of vertical and horizontal decomposition of the design problem. Moreover, the synthesis methods and existing software tools are considered. The analysis revealed the need to automate the process of designing software and algorithms of group control systems. We considered the synthesis procedures and proposed opportunities to simplify them using such software engineering methods as a formal verification of software and domain-specific languages. The problems of specialized computer-aided design (CAD) system for software and algorithms of control system for group of mobile robots are formulated. Furthermore, the directions of future development are briefly outlined.

Keywords: control system, group control, distributed system, discrete-event system, dynamic reconfiguration, software and algorithms, mobile robot, design automation

DOI: 10.17587/it.26.274-282

References

1. Kalyaev I. A., Gajduk A. R., Kapustyan S. G. Models and algorithms of collective control in groups of robots, Moscow, FIZMATLIT, 2009, 280 p. (in Russian).
2. Beloglazov D. A., Gajduk A. R., Kosenko E. Yu., Medvedev M. Yu., Pshihopov V. H., Solov'ev V. V., Titov A. E., Finaev V. I., Shapovalov I. O. Group control of moving objects in uncertain environments, Moscow, FIZMATLIT, 2015, 305 p. (in Russian).
3. Man'ko S. V., Diane S. A.K., Lohin V. M., Romanov M. P. Models, software and algorithmic support of multi-agent robotic systems, *Vestnik MGTU MIREA*, 2015, vol. 1, no. 3, pp. 166–191 (in Russian).
4. Mu B., Chen J., Shi Ya., Chang Ya. Design and Implementation of Nonuniform Sampling Cooperative Control on a Group of Two-Wheeled Mobile Robots, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 64, no. 6, pp. 5035–5044.
5. Hu X., Zeigler B. P., Mittal S. Variable Structure in DEVS Component-Based Modeling and Simulation, *Simulation*, 2005, vol. 81, no. 2, p. 91–102.
6. Kozov A. V., Volosatova T. M., Tachkov A. A. Directions of automation of designing of control systems for mobile robot groups, *Fundamental'no-prikladnye problemy bezopasnosti, zhi-vuchesti, nadozhdnosti, ustojchivosti i effektivnosti sistem*, Elec, 2019, pp. 335–339 (in Russian).
7. Petuhov G. B., Yakunin V. I. Methodological foundations of external design of targeted processes and purposeful systems, Moscow, AST, 2006, 504 p. (in Russian).
8. Maksimov A. A., Tachkov A. A., Malyhin A. Yu., Rudianov N. A. An approach to formalization of mission plan for group of military unmanned vehicles, *Voprosy oboronnoj tekhniki*, 2017, no. 7–8, pp. 88–96 (in Russian).
9. Lysenko I. V. Assessing the effectiveness of the functioning of human-machine systems: a probabilistic approach, *Trudy SPIIRAN*, 2002, vol. 1, no. 1, pp. 49–64 (in Russian).
10. Apraksin Yu. K. Control of information interaction in distributed technical systems. Finite state machine approach, Moscow, INFRA-M, 2017, 182 p. (in Russian).
11. Shcherbatov I. A., Protalinskij I. O., Protalinski O. M. Robot group control: a component approach, *Informatika i sistemy upravleniya*, 2015, vol. 43, no. 1, pp. 93–104 (in Russian).
12. Karpenko A. P., Leshchev I. A. Nature-Inspired Algorithms for Global Optimization in Group Robotics Problems, *Smart Electromechanical Systems: Group Interaction*, Cham, 2019, pp. 91–106.
13. Hüttenrauch M., Šošić A., Neumann G. Deep Reinforcement Learning for Swarm Systems, *Journal of Machine Learning Research*, 2019, vol. 20, no. 54, pp. 1–31.
14. Wonham W. M., Cai K. Supervisory Control of Discrete-Event Systems. Cham, Springer, 2018, 502 p.
15. Zeigler B. P. Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models: Intelligent Agents and Endomorphic Systems, Academic Press, 1990, 397 p.
16. Wonham W. M., Cai K., Rudie K. Supervisory Control of Discrete-Event Systems: A Brief History, *Annual Reviews in Control*, 2018, vol. 45, pp. 250–256.
17. Ambarcumyan A. A. Network-Centric Control Based on Petri Nets in the Structured Discrete-Event System, *Automation and Remote Control*, 2012, vol. 73, no. 7, pp. 1227–1241.
18. Filippov A. K. The theoretical fundamental for the design of dynamically reconfigurable information processing systems, Vladimir, 2010, 119 p. (in Russian).
19. Kalyaev I. A., Levin I. I. High-performance modular-scalable multiprocessor systems based on reconfigurable element base, *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye: novye vychislitel'nye tekhnologii*, 2007, vol. 8, no. 2, pp. 24–33 (in Russian).
20. Karpenko A. P., Chernecov S. A. Balancing the load of a distributed heterogeneous computing system using GRID by parallelizing one class of tasks, *Nauka i obrazovanie*, 2008, no. 11, pp. 1–10 (in Russian).
21. Wonham W. M., Ramadge P. J. Modular Supervisory Control of Discrete-Event Systems, *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 1988, vol. 1, no. 1, pp. 13–30.
22. Ambartsumyan A. A., Tomilin E. E. Supervisor Direct Synthesis Method for a Structured Discrete Dynamical System, *Automation and Remote Control*, 2010, vol. 71, no. 8, pp. 661–1679.
23. Zaytoon J., Riera B. Synthesis and Implementation of Logic Controllers — A Review, *Annual Reviews in Control*, 2017, vol. 43, pp. 152–168.
24. Ambartsumyan A. A. Supervisory Control of the Structured Dynamic Discrete-Event Systems, *Automation and Remote Control*, 2009, vol. 70, no. 8, pp. 156–176.
25. Alekseev V. A., Yakovlev D. S., Tachkov A. A. Modeling a hierarchical control system for a group of ground-based robots, *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii*, 2018, no. 4, pp. 1–20 (in Russian).
26. Krizan J., Ertl L., Bradac M., Jasansky M., Andreev A. Automatic Code Generation from Matlab/Simulink for Critical Applications, *2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Toronto, 2014, pp. 1–6.
27. Tachkov A. A., Vukolov A. Yu., Kozov A. V. Peculiarities of porting the Robot Operating System framework onto Elbrus platform, *Software & Systems*, 2019, vol. 32, no. 4, pp. 655–664 (in Russian).
28. Clarke Jr. E. M., Grumberg, O., Kroening, D., Peled, D. Model checking, MIT press, 1999, 330 p.
29. Fowler M. Domain-specific languages, Pearson Education, 2010, 610 p.
30. Maksimov A. A. One approach to building a finite-state machine control network // *Vestnik MGTU im. N. E. Bauman*, 2012, no. 6, pp. 14–28 (in Russian).

Е. А. Басыня, канд. техн. наук, доц.¹, директор², e-mail: director@nii-ikt.ru,

¹Новосибирский государственный технический университет,

²Научно-исследовательский институт информационно-коммуникационных технологий,
г. Новосибирск

Система интеллектуально-адаптивного управления информационной инфраструктурой предприятия

Предлагается новая система интеллектуально-адаптивного управления информационной инфраструктурой предприятия, функционирующая на основе ранее представленного [10] одноименного метода. Ее назначение заключается в осуществлении системного анализа, обработки информации и управления сложными системами информационной инфраструктуры предприятия в целях повышения их эффективности и отказоустойчивости даже в нештатных режимах работы. Предоставляется возможность противодействия несанкционированным исследованиям технических объектов и систем с исключением возможности компрометации управляющих воздействий.

Ключевые слова: интеллектуально-адаптивное управление, нештатные воздействия, самообучение, сетевой трафик, локальные информационные процессы, TCP/IP, информационная безопасность, маскировка, профилирование источников, ловушки

Введение

Динамическое развитие информационно-коммуникационных технологий является катализатором роста мировой экономики. Вопросы информационной безопасности приобретают первостепенное значение для любого хозяйствующего субъекта. Уровень защищенности информации любой компании является следствием эффективности подходов к системному анализу, управлению и обработке информации.

Значительный вклад в разработку методов управления потоками и процессами информационной инфраструктуры предприятия в контексте обеспечения надежного и отказоустойчивого функционирования внесли Y. Lan, Y. Sun, S. Liu, Z. Ma, L. Nie, C. Xin, L. Juhao и др. [1–3]. Однако данные исследования не принимают в расчет незадекларированные воздействия, в том числе инсайдерские угрозы.

Исследованиями в области теории управления информационными потоками на основе идентификации аномальной активности занимаются K. Vengatesan, K. Abhishek, N. Radhakrishana, K. Verma, Y. Qing, G. Xiaowei, Y. Gao и др. [4–6]. Другое интересное направление заключается в построении и работе с мате-

матическими моделями сетевого трафика и представлено в работах А. В. Черниговского, М. В. Кривова, А. П. Буслаева, Д. А. Кучелева, М. В. Яшина [7–9].

К сожалению, данные подходы не дают однозначного результата в реальных сетевых инфраструктурах, где функционируют различные криптоустойчивые алгоритмы и протоколы шифрования, технологии виртуальных защищенных каналов связи.

Соответственно возрастает актуальность разработки проблемно-ориентированных систем управления информационными потоками и процессами, позволяющих в автоматическом режиме осуществлять противодействие несанкционированным воздействиям, в том числе исследованию технических объектов и систем.

1. Цель работы и постановка задач

Целью данной работы являлась разработка системы интеллектуально-адаптивного управления информационной инфраструктурой предприятия. Назначением системы является проведение системного анализа, обработки информации и управления сложными систе-

мами информационной инфраструктуры предприятия в целях повышения их эффективности, надежности и отказоустойчивости даже в нештатных режимах работы.

Ставилась задача автоматического противодействия несанкционированным внутренним и внешним исследованиям технических объектов и систем. Следовало исключить возможность первичного сбора информации о компонентах информационной инфраструктуры предприятия злоумышленником, использующим инструменты активного и пассивного анализа информационных систем и вычислительных сетей.

Требовалось создать возможность разграничения хакеров с осуществлением их дезинформации по разным сценариям. Было необходимо расширить функции самообучения системы с учетом анализа вредоносных действий подозрительных субъектов взаимодействия.

Было необходимо исключить даже потенциальную вероятность компрометации управляющих воздействий.

2. Предлагаемое решение

Система интеллектуально-адаптивного управления информационной инфраструктурой предприятия (далее Система или СИАУ ИИП) функционирует на основе ранее представленного одноименного метода [10]. Рассмотрим ее работу поэтапно.

В первую очередь выполняется сбор, обработка и системный анализ информационных потоков, процессов и ресурсов всех объектов корпоративной инфраструктуры предприятия. Достигается данная цель посредством использования инструментов активного и пассивного сетевого анализа трафика и информационных ресурсов, интеграции с модифицированным блокчейн-хранилищем и системой управления доверием к регистрируемой информации, анализом информационных процессов через взаимодействие с авторскими клиентскими модулями на хостах и управляемом сетевом оборудовании.

Следующие программные продукты используются как модули системы (каждый из них представляет собой объект интеллектуальной собственности: получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ):

➤ автоматизированная система сетевого и системного администрирования операционных систем семейства Windows и Linux.

Расширяет функционал Help и Service Desk систем обработкой инцидентов в атематическом режиме;

- распределенная система сбора, обработки и анализа событий информационной безопасности информационной инфраструктуры предприятия. Позволяет однозначно идентифицировать сложные локальные инциденты с последующим автоматическим исправлением ошибок на основе базы знаний. Самообучение реализовано оригинальным сигнатурным, корреляционным и статистическим подходом к итерационному тестированию и имитации известных сетевых и локальных воздействий с отслеживанием реакции операционных систем и приложений в изолированной среде [11];
- система обнаружения и предотвращения вторжений и фальсификации реестра событий на основе децентрализованного подхода. Расширяет функционал IDS/IPS и SIEM. Позволяет повысить отказоустойчивость и надежность функционирования информационной инфраструктуры предприятия даже в случае технических сбоев в работе отдельных объектов и систем. Исключает ошибки идентификации инцидентов/технических проблем за счет формирования объективного и информативного децентрализованного реестра событий на основе модифицированного блокчейн-хранилища с оригинальной системой управления доверием к регистрируемым событиям;
- система самоорганизующегося виртуального защищенного канала связи на основе стохастического многослойного шифрования и оверлейных технологий. Позволяет повысить надежность и отказоустойчивость сетевого взаимодействия хостов с исключением глобальной наблюдаемости и анализа коммуникаций. Нивелирует риск потенциальной эксплуатации даже неизвестных уязвимостей и ошибок используемых технологий. Применяется авторская технология маскировки трафика с автономным составлением секретной последовательности действий на стороне клиента и сервера для последующего удаленного доступа [12];
- комплексное обеспечение управляемого сетевого оборудования ARK-Gateway. Представляет собой прошивки коммутаторов, маршрутизаторов, шлюзов и другого управляемого сетевого оборудования, имеющих возможность стекирования и объединения в единую экосистему;

- система интеллектуально-адаптивного управления трафиком вычислительной сети. Позволяет комплексно анализировать сетевой трафик на всех уровнях стека протоколов TCP/IP с возможностью идентификации новых типов возмущений и выработкой оптимальной стратегии их обработки;
- система автоматического управления информационными потоками корпоративных вычислительных сетей. Позволяет обрабатывать метаинформацию сетевого трафика и локальных файлов, осуществлять управление информационными потоками на ее основе;
- система автоматического противодействия инструментам несанкционированного активного и пассивного анализа информационных систем и вычислительных сетей. Позволяет использовать инструменты ловушек, маскировки и фальсификации различных операционных систем и функционирующих на них сервисов и служб;
- комплексная система управления сетевой информационной безопасностью предприятия. Сочетает функционал систем защиты на всех уровнях стека протоколов TCP/IP с полноценным покрытием информационной инфраструктуры предприятия и проведением корреляционного анализа инцидентов;
- система мониторинга работы пользователей персональных компьютеров. Осуществляет учет рабочего времени пользователя и всех его локальных и сетевых действий в рамках правового поля, определенного законодательством РФ;
- система интеллектуального контроля и управления доступом к информационным ресурсам персонального компьютера. Пресекается несанкционированный доступ к данным даже при разблокированной операционной системе. Задействуются алгоритмы профилирования доступа средствами BIOS/UEFI (от проверки целостности конфигурации аппаратно-программной части до парольной защиты), модифицированная технология инкапсулированного шифрова-

ния с сокрытием основной операционной системы и фальсификации ОС-ловушки. Применяются методики мониторинга подключаемых сетей и оборудования, наличия связанных устройств в зоне видимости. Задействуется поведенческий анализ действий пользователя и семантический анализ посещаемых Интернет-ресурсов в сочетании с технологией глубокого анализа содержимого дейтаграмм, а также методы анализа биометрических данных (клавиатурного почерка, голоса, лица).

Блок-схема общего принципа функционирования Системы представлена на рис. 1, который отражает фоновые процессы в штатном режиме работы, выполняемые параллельно.



Рис. 1. Блок-схема общего принципа функционирования СИАУ ИИП

СИАУ ИИП осуществляет непрерывный мониторинг неисправностей, уязвимостей, угроз и некорректных настроек технических объектов с последующим их устранением в автоматическом режиме. В случае необходимости вмешательства технического специалиста Система предоставляет интеллектуальную поддержку принятия решений, описанную ранее.

В целях упреждающего воздействия на негативные последствия подозрительных возмущений различного уровня риска, в том числе несанкционированного исследования объектов, Система применяет широкий спектр методов фальсификации информации об информационной инфраструктуре и ее объектах: формируются ложные слепки операционных систем и сервисов с различными уязвимостями, выполняется генерация фальшивого трафика в целях имитации функционирования сервисов и

служб, осуществляется периодическая отправка в открытом виде ловушек аутентификации, различных параметров сфальсифицированных системных сервисов.

Важно отметить, что СИАУ ИИП действует параллельно в сегменте локальных (ЛВС) и глобальных вычислительных сетей (ГВС) с применением соответствующей специфики.

Цель мероприятий в локальном сегменте — корректная маскировка Системы в рабочей области узлов с последующей идентификацией инсайдеров, злоумышленников из числа доверенных лиц.

Установка в глобальном сетевом сегменте нацелена на идентификацию, профилирование и обработку подозрительных воздействий с пресечением потенциальной возможности сбора информации об информационной инфраструктуре. В отличие от стратегии в ЛВС

задействуется генерация широкого спектра обманных элементов с последующей дезинформацией источника возмущений даже в случае маскировки запросов средствами анонимизации.

Результатом описанных действий является пресечение несанкционированного исследования узлов и сетей, осуществление объективного мониторинга и эффективного комплексного управления объектами информационной инфраструктуры предприятия посредством выбора оптимальных стратегий реагирования.

Фоновые процессы Системы в случае идентификации несанкционированных внешних возмущений представлены на рис. 2.

Проводится классификация уровня риска. Для всех категорий воздействий осуществляется базовая имитация слепков операционной системы и сервисов с уязвимостями. Все источники возмущений исследуются средствами активного и пассивного анализа трафика и информационных ресурсов, выполняется исчерпывающий сбор информации через системы анонимизации (оверлейные технологии и сети, VPN-сервисы и прочие средства).

Примитивные нештатные возмущения обрабатываются согласно сигнатурам. Подозрительные воз-

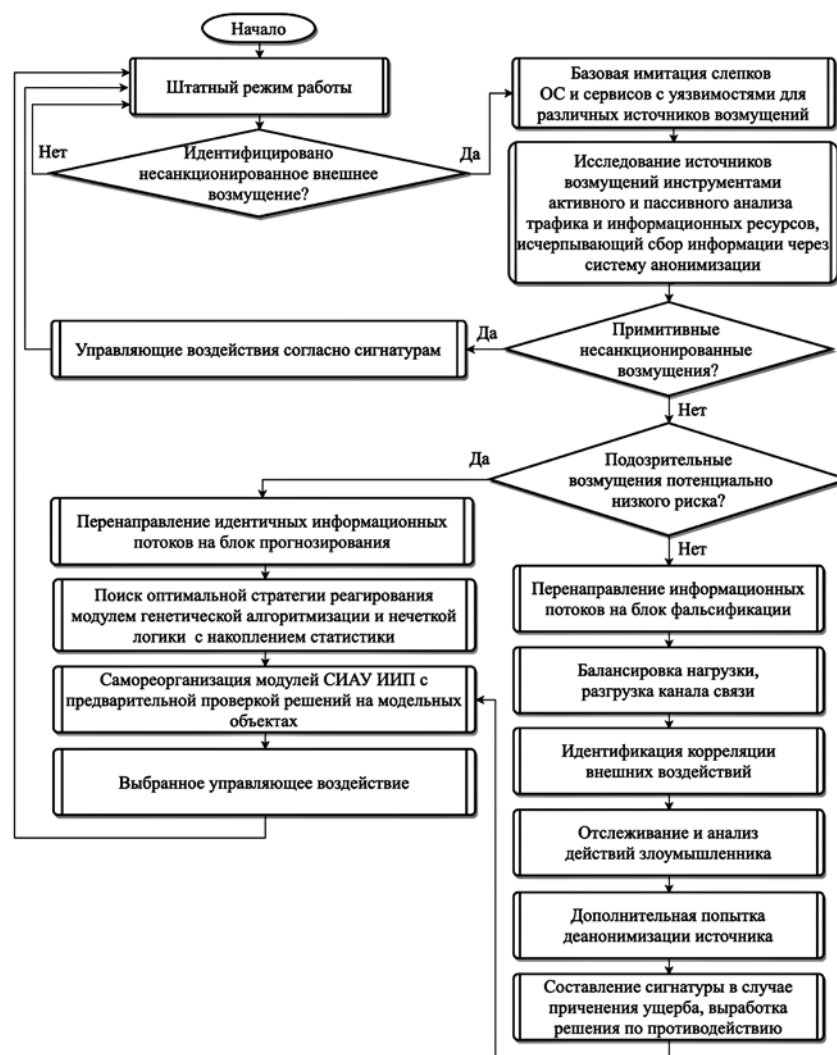


Рис. 2. Блок-схема обработки несанкционированных внешних возмущений СИАУ ИИП

действия потенциально низкого риска могут включать легитимный сигнал. Соответственно, осуществляется перенаправление идентичных информационных потоков на блок прогнозирования. Далее выполняется поиск оптимальной стратегии реагирования на модельных объектах с использованием ранее описанного модуля генетической алгоритмизации и нечеткой логики. Система накапливает и анализирует статистику с дополнительной проверкой выработанных действий на модельных объектах. При необходимости осуществляется реконфигурация правил и модулей фильтрации с самореорганизацией компонентов Системы. Затем осуществляется управляющее воздействие, Система переходит в штатный режим работы после успешной оптимизации загрузки канала связи.

В случае идентификации подозрительных возмущений среднего и высокого рисков выполняется перенаправление информационных потоков на блок фальсификации, в рамках которого подготовлены виртуальные машины с различными операционными системами (как пользовательскими, так и серверными версиями ОС семейства Windows, Linux, Mac OS) и функционирующими на них сервисами. Данные объекты изолированы от рабочей информационной инфраструктуры многоуровневой инкапсулированной виртуализацией и сегментацией виртуального сетевого трафика.

Перенаправление информационных потоков на требуемые объекты фальсификации осуществляется в соответствии с ранее имитированными следами ОС и сервисов с уязвимостями для конкретных источников. Важно отметить, что даже в случае осуществления внешних воздействий через сервисы анонимизации Система разграничивает источники с высоким уровнем достоверности и фальсифицирует нужный объект, не вызывая подозрений у сторонних субъектов взаимодействия.

Проводятся отслеживание и комплексный анализ действий злоумышленника клиентским программным обеспечением, интегрированным в объект фальсификации. При условии нарушения штатного режима работы последнего Система автоматически создает сигнатуру сбоя и генерирует комплекс мер, устраняющих потенциальную возможность повторения данной проблемы с исключением из выборки решений с данной уязвимостью. Параллельно осуществляется идентификация корреляций внешних воздействий с балансировкой нагрузки и разгрузкой канала связи. Используются механиз-

мы "информационных ловушек": от имитации состояния зависания до скрытого перенаправления, что помогает установить круг соучастников и расширить "черные" списки.

В автоматическом режиме реализуется дополнительная попытка деанонимизации источника не только инструментами активного и пассивного анализа трафика и информационных ресурсов, но и различными скриптами в смоделированных веб-ресурсах, вредоносными замаскированными исполняемыми файлами, оставленными на объекте фальсификации как дезинформация с выполнением кода, приводящая к исчерпывающему сбору информации об источнике.

Заключительным этапом выступает самореорганизация модулей СИАУ ИИП с предварительной проверкой выработанных решений на модельных объектах с аддитивным фоновым тестовым сетевым трафиком. После проведения управляющего воздействия и нейтрализации проблемных возмущений система переходит в штатный режим работы.

Таким образом, СИАУ ИИП динамически самообучается и самореорганизуется, идентифицируя и обрабатывая без риска даже ранее неизвестные типы воздействий.

Важно отметить, что предлагаемая система предоставляет возможность централизованного конфигурирования и мониторинга всех объектов через веб-интерфейс панели администрирования (включая все сетевое оборудование), а также выступает единым центром автоматического управления всей инфраструктуры предприятия, не лишая узлы самостоятельности в выполнении их целевых функций и обработке примитивных нештатных воздействий.

Стоит рассмотреть простой пример. В случае технического сбоя сетевого адаптера электронно-вычислительного устройства может появиться шум в канале связи, который не может однозначно идентифицировать коммутатор. Система предпринимает попытки через клиентский модуль проблемного устройства программно устранить неполадку в автоматическом режиме.

Если проблема является аппаратной, то техническому специалисту поддержки отправляется уведомление с отчетом и рекомендациями заменить/отремонтировать сетевой адаптер. Информирование осуществляется через электронную почту и push-уведомления мобильного приложения. Параллельно из центра управления коммутатору поступает указание с проведением действий по фильтрации трафика с блокировкой потоков по соответствующему

MAC-адресу поврежденного адаптера во избежание негативных последствий в сетевом сегменте.

Подобный централизованный подход к управлению является гибким, функциональным и надежным. Однако не исключена вероятность компрометации управляющих воздействий. В целях нивелирования подобных рисков был разработан оригинальный алгоритм дополнительной проверки подлинности и правомерности не только субъекта взаимодействия, но и его действий. Для этого в сетевую инфраструктуру интегрирован авторский децентрализованный реестр событий на основе модифицированного блокчейн-хранилища с системой управления доверием к регистрируемой информации.

Когда объект критический информационной инфраструктуры получает от головной системы управляющее воздействие, к нему прилагается список событий, повлекших за собой данное решение. Хост-исполнитель обращается к децентрализованному реестру событий и проверяет факт их существования, а также рейтинг доверия к этим данным. Далее сопоставляет их с общедоступной базой знаний реагирования. После успешной проверки выполняет требуемые действия.

Важно отметить, что сетевое взаимодействие хостов осуществляется безопасно на базе самоорганизующегося виртуального защищенного канала связи на основе стохастического многослойного шифрования и оверлейных технологий.

Достигается проверка подлинности и правомерности управляющих воздействий. Дополнительным интересным авторским решением является децентрализованное распределение трафика с многослойным шифрованием внутри корпоративной сети при подозрительной активности межсетевых хостов на основе рейтинга доверия к ним.

Таким образом, последовательно решены все ранее поставленные задачи.

Заключение

Была разработана система интеллектуально-адаптивного управления информационной инфраструктурой предприятия, целевым назначением которой выступает проведение системного анализа, обработки информации и управления сложными системами информационной инфраструктуры предприятия в целях повышения их эффективности, надежности и отказоустойчивости даже в нештатных режимах работы.

Научная новизна предлагаемого решения заключается в интеллектуальной обработке нештатных внутренних и внешних возмущений на изолированных модельных объектах посредством применения генетической алгоритмизации и нечеткой логики. Адаптивное управление информационными потоками и процессами достигается прогнозированием реакции сервисов/хостов на модельных объектах с самоорганизацией правил и модулей системы через обратную связь. Другим аспектом научной новизны выступает централизованное управление критическими объектами информационной инфраструктуры с проверкой хостами-исполнителями аргументации требуемых от них действий через объективный и информативный децентрализованный реестр событий на основе модифицированного блокчейн-хранилища с системой управления доверием к регистрируемой информации. Оригинальным функционалом выступает интеллектуальная поддержка при принятии управленческих решений в технических системах для широкого спектра специалистов: от инженеров информационной безопасности до системных и сетевых администраторов.

Проектирование, программная реализация и исследование системы интеллектуально-адаптивного управления информационной инфраструктурой предприятия будут представлены в следующих работах.

Список литературы

1. Lan Y., Sun Y., Liu S., Ma Z. A real-time network traffic analysis and QoS management platform // Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN), Guangzhou, China. 2017. P. 266—270.
2. Nie L. Traffic matrix estimation approach based on partial direct measurements in large-scale IP backbone networks // Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication, Beijing, China. 2015. P. 178—181.
3. Xin C., Juhao L., Paikun Z., Ruizhi T. and oth. Fragmentation-aware routing and spectrum allocation scheme based on distribution of traffic bandwidth in elastic optical networks // IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking. 2015. Vol. 7, Iss. 11. P. 1064—1074.
4. Vengatesan K., Abhishek K., Radhakrishana N., Verma K. Anomaly Based Novel Intrusion Detection System For Network Traffic Reduction // Proceedings of the 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud), Palladam, India. 2018. P. 688—690.
5. Qing Y., Xiaowei G. Network Traffic Anomaly Detection Based on Dynamic Programming // Proceedings of the International Conference on Computing Intelligence and Information System (CIIS), Nanjing, China. 2017. P. 62—65.
6. Gao Y. Network Anomaly Traffic Detection Method Based on Support Vector Machine // Proceedings of the International Conference on Smart City and Systems Engineering (ICSCSE), Hunan, China. 2016. P. 3—6.

7. Черниговский А. В., Кривов М. В. Подбор математической модели сетевого трафика // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2018. Т. 1. С. 90–91.

8. Буслаев А. П., Кучелев Д. А., Яшина М. В. Динамические системы и математические модели трафика информации // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12, № 3. С. 22–38.

9. Черниговский А. В., Кривов М. В. Основные модели сетевого трафика // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2017. № 11. С. 137–143.

10. Басыня Е. А. Метод интеллектуально-адаптивного управления информационной инфраструктурой предприятия // Информационные технологии. 2020. Т. 26, № 3. С. 185–191.

11. Басыня Е. А. Распределенная система сбора, обработки и анализа событий информационной безопасности сетевой инфраструктуры предприятия / Безопасность информационных технологий. 2018. Т. 25, № 4. С. 43–52.

12. Басыня Е. А. Система самоорганизующегося виртуального защищенного канала связи // Защита информации. Инсайд. 2018. № 5 (83). С. 10–15.

E. A. Basinya, Ph.D., Professor¹, Director², e-mail: director@nii-ikt.ru,

¹Novosibirsk State Technical University,

²Research Institute of Information and Communication Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

System for Intellectually Adaptive Management of the Enterprise Information Infrastructure

The aim of this work was to develop a system for intellectually adaptive management of the enterprise information infrastructure. The purpose of the System was to perform a system analysis, information processing and management of complex systems of an enterprise's information infrastructure in order to increase their efficiency, reliability and fault tolerance even in abnormal operating modes. As a result, a system was developed that operates on the basis of the previously presented eponymous method and addresses the preset tasks. The possibility of automatic counteraction to unauthorized internal and external research of technical objects and systems has been implemented. A mechanism for distinguishing between hackers and their misinformation according to different scenarios has been carried out. The self-learning functions of the system are expanded taking into account the analysis of the malicious actions of suspicious interaction subjects. The possibility of the initial collection of information about the components of the information infrastructure of the enterprise by an attacker using tools of active and passive analysis of information systems and computer networks is excluded. The scientific novelty of the proposed solution lies in the intellectual processing of abnormal internal and external disturbances on isolated model objects through the use of genetic algorithmization and fuzzy logic. Adaptive management of information flows and processes is achieved by predicting the response of services / hosts on model objects with the self-organization of rules and system modules through feedback.

Keywords: intelligent and adaptive management, abnormal impacts, self-training, network traffic, local information processes, TCP/IP, information security, masking, source profiling, traps

DOI: 10.17587/it.26.283-289

References

1. Lan Y., Sun Y., Liu S., Ma Z. A real-time network traffic analysis and QoS management platform, *Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*, Guangzhou, China, 2017, pp. 266–270.

2. Nie L. Traffic matrix estimation approach based on partial direct measurements in large-scale IP backbone networks, *Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication*, Beijing, China, 2015, pp. 178–181.

3. Xin C., Juhao L., Paikun Z., Ruizhi T. and oth. Fragmentation-aware routing and spectrum allocation scheme based on distribution of traffic bandwidth in elastic optical networks, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, vol.7, iss.11, pp. 1064–1074.

4. Vengatesan K., Abhishek K., Radhakrishana N., Verma K. Anomaly Based Novel Intrusion Detection System For Network Traffic Reduction, *Proceedings of the 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)*, Palladam, India, 2018, pp. 688–690.

5. Qing Y., Xiaowei G. Network Traffic Anomaly Detection Based on Dynamic Programming, *Proceedings of the International Conference on Computing Intelligence and Information System (CIIS)*, Nanjing, China, 2017, pp. 62–65.

6. Gao Y. Network Anomaly Traffic Detection Method Based on Support Vector Machine, *Proceedings of the International Conference on Smart City and Systems Engineering (ICSCSE)*, Hunan, China, 2016, pp. 3–6.

7. Chernigovskij A. V., Krivov M. V. The selection of a mathematical model of network traffic, *Sovremennyye Tekhnologii i Nauchno-Tekhnicheskij Progress*, 2018, vol. 1, pp. 90–91 (in Russian).

8. Buslaev A. P., Kuchelelev D. A., Yashina M. V. Dynamic systems and mathematical models of information traffic, *T-Comm: Telekommunikacii i Transport*, 2018, vol. 12, no. 3, pp. 22–38 (in Russian).

9. Chernigovskij A. V., Krivov M. V. The main models of network traffic, *Vestnik Angarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 2017, no. 11, pp. 137–143 (in Russian).

10. Basinya E. A. The method of intellectually-adaptive management of the enterprise information infrastructure, *Informacionnye Tehnologii*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 185–191 (in Russian).

11. Basinya E. A. Distributed system of collecting, processing and analysis of security information events of the enterprise network infrastructure, *Bezopasnost' Informacionnykh Tekhnologij*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 43–52 (in Russian).

12. Basinya E. A. The System of Self-Organizing Virtual Secure Communication Channel, *Zashhita Informacii. Insajd*, 2018, no. 5 (83), pp. 10–15 (in Russian).

Л. В. Савченко, канд. техн. наук, e-mail: lsavchenko@hse.ru,
Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Нижний Новгород

Распознавание изолированных слов на основе взвешенного голосования дикторозависимых нейросетевых моделей

Рассматривается задача распознавания изолированных слов с помощью методов глубокого обучения и сверточных нейронных сетей. Предложено выполнить дообучение сетей для проведения адаптации акустических моделей на голос диктора с использованием малого числа произнесенных им реализаций эталонных слов. Для понижения вероятности ошибочного распознавания рассматривается комбинирование нескольких различных дообученных дикторозависимых нейросетевых моделей.

Ключевые слова: распознавание речи, сверточные нейронные сети, глубокое обучение, ансамбль моделей, адаптация акустической модели, взвешенное голосование

Введение

Задача распознавания речи в последнее время вызывает интерес из-за обширной сферы практического применения [1–3], например, в информационных системах поиска информации, диктовки текста, интерактивного речевого взаимодействия, при обучении людей с нарушением слуха [4, 5] и особенностями речи (акцент, заикание). Однако применение существующих систем распознавания на практике ограничено недостаточно высокой степенью надежности их функционирования в условиях интенсивных акустических помех, таких как шум улицы, звуки от проезжающего транспорта, речь посторонних лиц. Даже при малой интенсивности такого рода помех эффективность систем распознавания, как правило, существенно снижается [6]. В настоящее время наибольшей точностью распознавания характеризуются способы формирования акустических моделей на основе технологий глубокого обучения и, в частности, сверточных нейронных сетей (СНС) [7]. Известно большое число различных архитектур СНС, применимых для распознавания речи, точность которых может существенно варьироваться в зависимости от уровня помех и особенностей речи конкретного диктора.

Для задач обработки изображений хорошо изучена возможность адаптации СНС к новой предметной области за счет дообучения с использованием обучающих выборок малого объема [8, 9]. Поэтому для повышения надежности распознавания изолированных слов и фраз в настоящей статье предлагается выполнить дообучение СНС на голос нового пользователя, что особенно важно для дикторов с дефектами

речи (акцент, заикание, отсутствие в речи некоторых звуков) и при распознавании неродной речи [10]. Для дальнейшего повышения точности предлагается рассматривать формирование ансамблей таких дообученных акустических моделей [11, 12]. Полученные результаты и сделанные по ним выводы представляют интерес для широкого круга специалистов в области автоматического распознавания речи.

Нейросетевые методы распознавания изолированных слов

Задача распознавания слов состоит в том, чтобы входному (распознаваемому) слову X поставить в соответствие наиболее близкое слово из словаря, содержащего R различных слов [1]. Одним из наиболее популярных методов решения задачи в настоящее время является использование глубоких нейронных сетей [13], которые предполагают моделирование акустических сигналов с помощью многоуровневых последовательно соединенных слоев нелинейных функций. Например, такие известные приложения голосового поиска, как Google и Apple Siri реализованы с помощью глубоких рекуррентных сетей. Отметим, что при этом выполняется множество матричных вычислений, а это приводит к существенным затратам вычислительных ресурсов (хранение акустической модели) на этапе распознавания. Глубокие сети оказываются чувствительными к репрезентативности обучающего множества (речевого корпуса), поэтому их применение может привести к неудовлетворительным результатам для распознавания нестандартной

речи (при наличии помех, дефектов произношения и т.п.) [1].

Поэтому в последнее время все чаще применяются СНС, которые не только характеризуются намного более высокой скоростью принятия решений, но и показали более точные результаты распознавания на больших и маленьких словарях в ряде работ [14, 15]. Используемая в них свертка издавна применялась в цифровой обработке речевых сигналов в разнообразных методах линейной фильтрации. Особенность СНС заключается в том, что в ней нейроны первых уровней упорядочены в особую структуру — на первых слоях нейроны разбиты на карты признаков определенного размера, и разные карты внутри одного слоя соответствуют нейронам разного типа, которые реагируют на разные особенности спектра речевого сигнала. Например, в библиотеке TensorFlow используется СНС типа `cnn-trad-fpool3`, которая позволяет повысить точность распознавания изолированных слов по сравнению с глубокими нейронными сетями на 27 % [16]. На выходе СНС получаются оценки апостериорной вероятности принадлежности к каждому r -му слову с помощью `softmax` активации [17]:

$$P(r|X) = \frac{\exp(z_r)}{\sum_{j=1}^R \exp(z_j)}, \quad r = 1, 2, \dots, R. \quad (1)$$

Здесь z_r — выход r -го нейрона предпоследнего слоя СНС, на вход которой подан речевой сигнал X .

Большинство современных систем распознавания речи ориентируются на дикторонезависимое распознавание речи в благоприятных условиях, в которых акустические помехи сведены к минимуму [6]. В то же время результаты распознавания могут значительно ухудшаться, например, при наличии во входном сигнале помех или при существенных отличиях голоса пользователя от большинства голосов дикторов в речевой базе данных, использующейся для обучения СНС. Поиску путей повышения точности нейросетевых моделей и посвящена настоящая статья.

Предложенный подход

Прежде всего отметим, что вычислительная сложность нейросетевых моделей, применяющихся для распознавания изолированных

слов [16], является достаточно низкой. Поэтому на практике для повышения точности распознавания можно использовать традиционные для распознавания образов комитеты классификаторов на основе ансамбля нескольких различных моделей [12, 18]. Рассмотрим далее наиболее часто применяющиеся ансамбли, не требующие наличия дополнительной большой обучающей выборки. Пусть на вход K акустических моделей подается слово X , и в результате на выходе каждой из них получаются оценки апостериорной вероятности $P_k(r|X)$, $k = 1, K$, $r = 1, R$ (1). Тогда решение принимается в пользу r -го слова согласно одному из критериев:

1. *Максимум апостериорной вероятности*

$$r^* = \arg \max_{r=1, R} \max_{k=1, K} P_k(r|X). \quad (2)$$

2. *Максимум средней апостериорной вероятности (sum rule [18])*

$$r^* = \arg \max_{r=1, R} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K P_k(r|X). \quad (3)$$

3. Если предположить, что все K моделей независимы, то можно оценить итоговую апостериорную вероятность как произведение выходов (1) каждой модели. Такое правило (product rule [18]) в вычислительном плане обычно записывается с использованием *логарифма средней апостериорной вероятности*:

$$r^* = \arg \max_{r=1, R} \log \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K P_k(r|X). \quad (4)$$

4. В работах [19, 20] показаны преимущества построения ансамблей на основе принципа *минимума информационного рассогласования (МИР) Кульбака—Лейблера*

$$k^* = \arg \min_{k=1, K} \sum_{j=1}^R \sum_{r=1}^R \left(P_k(r|X) \log \frac{P_k(r|X)}{P_j(r|X)} \right). \quad (5)$$

Решение принимается с помощью k^* -модели:

$$r^* = \arg \max_{r=1, R} P_{k^*}(r|X).$$

В описанных выше подходах предполагается, что все члены ансамбля вносят одинаковый вклад в итоговое решение. В то же время, как известно, точность распознавания с помощью различных СНС может существенно различаться. Поэтому в настоящей работе использу-

ются методы взвешенного голосования [19], в которых вес w_k , $k = \overline{1, K}$, каждой k -й модели предлагается определить пропорционально оценке ее точности на контрольном множестве при введении нормировки $\sum_{k=1}^K w_k = 1$. Чем точнее модель, тем больший вклад она вносит в итоговое решение. Будем рассматривать метод *максимума взвешенной суммы апостериорной вероятности*

$$r^* = \arg \max_{r=\overline{1, R}} \sum_{k=1}^K (w_k P_k(r|X)), \quad (6)$$

а также, по аналогии с (4), в предположении о независимости акустических моделей, критерий *максимума логарифма взвешенной суммы апостериорной вероятности*

$$r^* = \arg \max_{r=\overline{1, R}} \log \sum_{k=1}^K (w_k P_k(r|X)). \quad (7)$$

К сожалению, даже применение ансамбля акустических моделей не приведет к значимому повышению надежности распознавания в случае, если входной сигнал существенно отличается от образцов в обучающей выборке, например, при наличии акустических помех

или для дикторов с выраженными особенностями произношения, в том числе для неродного языка. Поэтому в данной статье предлагается по аналогии с доменной адаптацией для задач распознавания изображений [8, 9] выполнить настройку акустических моделей в ансамбле на голос конкретного пользователя. Для этого требуется сформировать небольшую выборку из 1...5 образцов произношений каждого из R слов.

На рис. 1 представлен предложенный алгоритм распознавания слов с адаптацией акустических моделей на голос диктора с использованием малого числа произнесенных им реализаций эталонных слов и комбинированием нескольких различных дообученных таких способом дикторозависимых нейросетевых моделей. Здесь для отбраковки некачественных речевых сигналов предлагается предварительно отбирать такие образцы, которые правильно распознаются исходной (дикторонезависимой) СНС. Далее стандартными средствами выполняется дообучение K акустических моделей с использованием собранного обучающего множества [8], после чего для принятия итогового решения применяется взвешенное голосование (5) или (6).

Входные данные: распознаваемое слово X , валидационное множество всех слов, K СНС (дикторонезависимых акустических моделей)

Выходные данные: метка класса слова из словаря $1, 2, \dots, R$

Параметры: число добавляемых эталонов m каждого слова

1. Для каждого r -го слова ($r = \overline{1, R}$) повторить

1.1. Пока число добавленных слов меньше m

1.1.1. Записать речевой сигнал X_r

1.1.2. Подать X_r на вход наилучшей СНС и оценить апостериорные вероятности

(1).

1.1.3. Если максимальная апостериорная вероятность соответствует r -му классу, то

1.1.3.1. Добавить слово X_r в базу данных эталонных слов.

3. Для $k = \overline{1, K}$ повторить

3.1. Провести дообучение k -й акустической модели (СНС) на основе малого числа m добавленных слов.

3.2. Оценить с помощью дообученной СНС точность P_k распознавания валидационного множества слов.

4. Для $k = \overline{1, K}$ повторить

4.1. Вычислить вес акустической модели $w_k = \frac{P_k}{\sum_{k=1}^K P_k}$.

5. Для каждого распознаваемого слова X

5.1. Для каждой k -й акустической модели вычислить апостериорные вероятности $P_k(r|X)$.

6. Вернуть ближайшее эталонное слово r^* с помощью взвешенного голосования (5) или (6).

Результаты экспериментальных исследований

В экспериментальной части статьи рассматривается задача оценки точности распознавания $R = 10$ слов английского языка ("zero", "one", "two", "three", "four", "five", "six", "seven", "eight", "nine") в зависимости от уровня шума. Дообучение СНС проводили с помощью набора сценариев Simple Audio Recognition из библиотеки TensorFlow. В эксперименте использовалось несколько встроенных акустических моделей. Модель conv базируется на топологии cnn-trad-fpool3 [16], модель low_latency_conv использует нейронную сеть cnn-one-fstride4 [16], модель low_latency_svdf использует топологию rank-constrained [21] (сжатие нейронных сетей) и модель tiny_conv состоит из одноверточного нейронного слоя (была разработана для работы на устройствах с небольшим объемом оперативной памяти) [16].

Рис. 1. Предлагаемый алгоритм распознавания слов на основе взвешенного голосования дикторозависимых нейросетевых моделей

Для записи речевых сигналов применяли встроенный в ноутбук микрофон. Частота дискретизации F была установлена равной 16 кГц. В соответствии с предложенным подходом (рис. 1) формировалось обучающее множество из 10 слов (по одной реализации каждого слова). Для каждой из четырех СНС веса w_k определялись в соответствии с оценкой точностью модели, полученной для обучающего множества. Были получены следующие значения весов: для модели conv $w_1 = 0,3$, для low_latency_conv $w_2 = 0,3$, для low_latency_svdf $w_3 = 0,25$ и для tiny_conv $w_4 = 0,15$.

Тестовое множество содержало 200 реализаций речевых сигналов (по 20 реализаций каждого слова). К записанным в идеальных условиях речевым сигналам добавлялся аддитивный гауссовский шум различной амплитуды.

На рис. 2 представлена временная диаграмма речевого сигнала слова "down" с разным уровнем аддитивного гауссовского шума, а на рис. 3 — оценки спектральной плотности мощности этих сигналов.

Из рис. 2, 3 видно, что наличие сильного шума приводит к изменениям спектральных характеристик, что очевидным образом сказывается на результатах распознавания.

В табл. 1 представлены результаты сравнительного анализа точности распознавания слов для всех доступных традиционных акустических моделей и их ансамблей без дообучения СНС и с дообучением СНС. Наилучшие результаты выделены полужирным шрифтом.

Из табл. 1 видно, что предложенное дообучение СНС даже на небольшом числе образцов (всего 10 эталонных слов) способно повысить

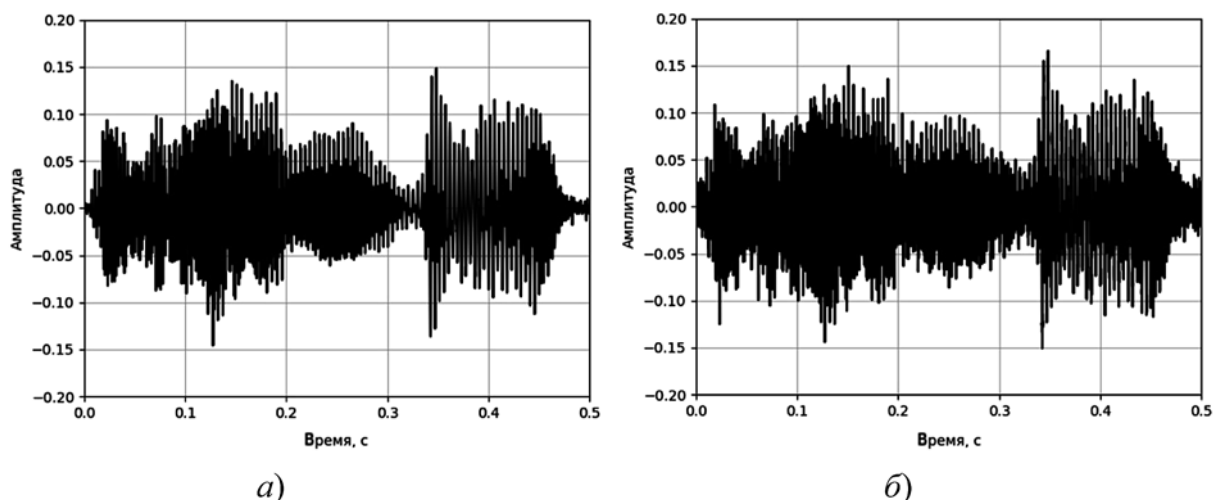


Рис. 2. Временная диаграмма речевого сигнала для слова "down":
а — отношение сигнал/шум 30 дБ; б — отношение сигнал/шум 10 дБ

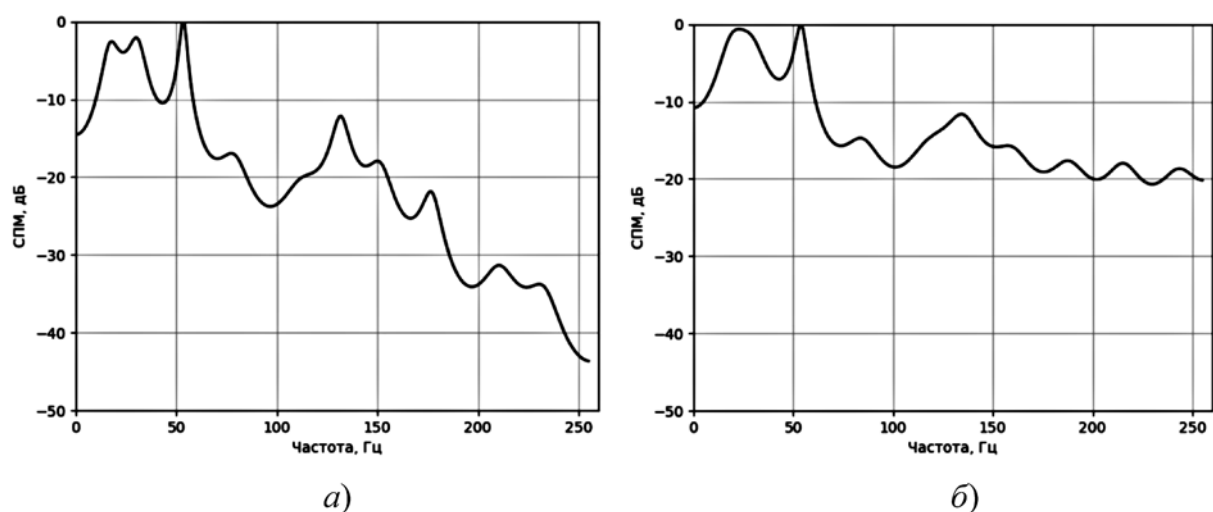


Рис. 3. Оценки спектральной плотности мощности (СПМ) речевого сигнала "down":
а — отношение сигнал/шум 30 дБ; б — отношение сигнал/шум 10 дБ

Таблица 1

**Сравнительный анализ точности распознавания (%) для традиционных акустических моделей
без дообучения СНС и с дообучением СНС**

Акустические модели	Отношение сигнал/шум, дБ						
	30	25	20	15	10	5	0
Conv	65,16	65,33	65,99	60,79	57,80	48,99	39,56
Low_conv	52,24	48,41	46,25	45,59	41,58	38,44	36,63
Low_svdf	66,71	63,19	65,29	58,03	55,43	40,88	40,69
Tiny	43,80	42,39	43,43	39,04	35,32	30,32	21,40
Conv с обучением	67,02	67,02	69,97	63,19	61,80	56,60	47,98
Low_conv с обучением	53,58	50,83	49,98	49,26	47,76	43,93	41,78
Low_svdf с обучением	67,64	65,02	67,19	62,83	62,87	49,88	45,69
Tiny с обучением	56,58	54,83	53,33	52,34	50,59	48,20	39,11

Таблица 2

**Сравнительный анализ точности распознавания (%) для ансамбля акустических моделей
без дообучения СНС и с дообучением СНС**

Акустические модели	Отношение сигнал/шум, дБ						
	30	25	20	15	10	5	0
Максимум вероятности (2)	68,54	69,05	67,23	65,17	61,24	51,65	38,49
Sum rule (3)	67,45	68,03	67,14	66,54	62,12	53,14	42,23
Product rule (4)	69,11	69,02	68,41	66,78	61,91	52,34	41,05
МИР (5)	67,98	68,02	67,37	67,13	63,69	52,82	40,23
Предложенный подход (6)	71,23	72,01	70,32	69,16	65,17	55,34	42,12
Предложенный подход (7)	70,83	71,09	70,12	69,62	64,12	54,47	42,08
Максимум вероятности (2) с обучением	69,34	70,05	68,76	67,29	63,45	48,14	42,56
Sum rule (3) с обучением	72,23	69,34	68,78	68,43	64,32	54,23	48,89
Product rule (4) с обучением	72,67	70,23	68,69	68,14	64,35	54,78	49,12
МИР (5) с обучением	70,23	70,12	68,75	68,54	68,08	55,43	49,15
Предложенный подход (6) с обучением	74,94	74,52	72,66	71,24	66,77	59,88	52,29
Предложенный подход (7) с обучением	73,43	72,38	71,35	72,15	68,26	57,19	50,44

точность распознавания на 2...8 %, что особенно заметно при наличии сильных помех. Так при отношении сигнал/шум 0 дБ точность возросла на 6...18 %.

Из табл. 2 можно заметить, что точность распознавания можно повысить на 5...7 % по сравнению с традиционными акустическими моделями (табл. 1), если в итоговом решении в задаче распознавания слов применять ансамбль акустических моделей на основе взвешенного голосования.

Заключение

В настоящей работе для повышения точности распознавания слов предложено, во-первых, проводить адаптацию акустических моделей на голос диктора с использованием малого числа произнесенных им реализаций эталонных слов. Во-вторых, для понижения вероятности ошибочного распознавания рассматривается комбинирование в одном ансамбле нескольких различных дообученных дикторо-

зависимых нейросетевых моделей. Итоговое решение в задаче распознавания принимается с помощью взвешенного голосования, при этом для определения весов используются оценки точности каждой акустической модели для обучающей выборки. Предложенный подход (см. рис. 1) позволяет существенно повысить точность распознавания, особенно при наличии акустических помех. Проведенные экспериментальные исследования показывают, что использование ансамбля дообученных акустических моделей (табл. 2) позволяет повысить точность распознавания по сравнению с традиционными методами на 5...7 %. В дальнейших исследованиях интерес представляет применение предложенного подхода при распознавании команд при наличии у обучающегося пользователя явно выраженных дефектов речи (таких, например, как заикание, наличие акцента, отсутствие в речи некоторых звуков).

Список литературы

1. Benesty J., Sondh M., Huang Y. Springer handbook of speech recognition. New York: Springer, 2008. 1176 p.
2. Савченко Л. В. Система постановки произношения на основе сверточных нейронных сетей и информационной теории восприятия речи // Информационные технологии. 2019. Т. 25. № 5. С. 313—318.
3. Савченко А. В., Савченко В. В. Метод измерения частоты основного тона речевого сигнала для систем акустического анализа речи // Измерительная техника. 2019. № 3. С. 59—63.
4. Савченко В. В., Акатьев Д. Ю. Обучение звуковому строю языка глухонемых и слабослышащих на основе информационной теории восприятия речи // Информационные технологии. 2010. № 2. С. 60—66.
5. Денисова И. А. Игровые технологии как условие повышения качества произношения учащихся с нарушениями слуха младшего школьного возраста // Череповецкие научные чтения. 2015. С. 52—54.
6. Савченко В. В. Распознавание речи на фоне шума методом фонетического декодирования слов // Телекоммуникации. 2016. № 9. С. 9—16.
7. Zhang Y., Chan W., Jaitly N. Very deep convolutional networks for end-to-end speech recognition // Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2017 IEEE International Conference on. IEEE. 2017. P. 4845—4849.
8. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep learning // MIT press. 2016. P. 781.
9. Savchenko A. Sequential three-way decisions in multi-category image recognition with deep features based on distance factor // Information Sciences. 2019. Vol. 489. P. 18—36.
10. Tao J., Ghaffarzadegan S., Chen L., Zechner K. Exploring deep learning architectures for automatically grading non-native spontaneous speech // 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2016. P. 6140—6144.
11. Tresp V. Committee machines, Handbook for Neural Network Signal Processing. CRC Press. 2001. P. 135—151.
12. Savchenko A. V. Adaptive Video Image Recognition System Using a Committee Machine // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2012. Vol. 21, N. 4. P. 219—226.
13. Hinton G. et al. Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition // IEEE Signal processing magazine. 2012. T. 29. P. 82—97.
14. Toth L. Combining Time-and Frequency-Domain Convolution in Convolutional Neural Network-Based Phone Recognition // Proceedings of the Acoustics, speech and signal processing (ICASSP). 2014. P. 190—194.
15. Sainath T. N., Mohamed A., Kingsbury B., Ramabhadran B. Deep Convolutional Neural Networks for LVCSR // Proceedings of the Acoustics, speech and signal processing (ICASSP). 2013. P. 8614—8618.
16. Sainath T. N., Parada C. Convolutional neural networks for small-footprint keyword spotting // Sixteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association (ICASSP). 2015. P. 1478—1482.
17. Liu W., Wen Y., Yu Z., Yang M. Large-margin softmax loss for convolutional neural networks // Proceedings of the International Conference on Machine Learning (ICML). 2016. Vol. 2, N. 3. P. 7.
18. Kittler J., Hatef M., Duin R. Matas J. On combining classifiers // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1998. V. 20, N. 3. P. 226—234.
19. Theodoridis S., Konstantinos K. Pattern recognition. Elsevier, 2008.
20. Савченко А. В. Образ как совокупность выборок независимых одинаково распределенных значений признаков в задачах распознавания сложноструктурированных объектов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80, № 3. С. 70.
21. Nakkiran P., Alvarez R., Prabhavalkar R., Parada C. Compressing deep neural networks using a rank-constrained topology // Sixteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association (ICASSP). 2015. P. 1473—1477.

L. V. Savchenko, PhD (Candidate of Sciences), e-mail: lsavchenko@hse.ru,
National Research University Higher School of Economics, N. Novgorod, Russian Federation

Isolated Words Recognition Based on Weighted Voting of Speaker-Dependent Neural Network Acoustic Models

The article deals with the problem of isolated words recognition based on deep convolutional neural networks. The use of existing recognition systems in practice is limited by an insufficiently high degree of their reliability functioning in conditions of intense acoustic noise, such as street noise, sounds from passing vehicles, etc. Nowadays, the most accurate recognition methods are characterized by the formation of acoustic models with deep learning technologies and, in particular, convolutional neural networks. For image processing problems the possibility of adaptation of such networks to a new domain with additional fine-tuning on rather small training samples is well studied. In this paper we proposed to perform additional training of networks

for adaptation of acoustic models on a speaker voice with use of small number of the utterances. In order to reduce the error rate, we consider an ensemble of several different speaker-dependent neural network architectures that have been trained in such a way. The final decision is made by a weighted voting rule, in which the weight of each acoustic model is determined in proportion to the accuracy estimated on the training set. The experimental results for recognition of English commands proved that such ensemble of pre-trained acoustic models can significantly improve accuracy compared to traditional pre-trained models, especially if the white Gaussian noise is added to the input signal.

Keywords: speech recognition, isolated words recognition, convolutional neural networks, deep learning, ensemble of neural networks, acoustic model adaptation, weighted voting

DOI: 10.17587/it.26.290-296

References

1. Benesty J., Sondh M., Huang Y. Springer handbook of speech recognition, New York, Springer, 2008, 1176 p.
2. Savchenko A. V. Computer-assisted language learning based on convolutional neural networks and information theory of speech perception, *Information Technologies*, 2019, vol. 25, no. 5, pp. 313–318 (in Russian).
3. Savchenko A. V., Savchenko V. V. A Method for Measuring the Pitch Frequency of Speech Signals for the Systems of Acoustic Speech Analysis, *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 3, pp. 282–288.
4. Savchenko V. V., Akatjev D. Yu. Learning the sound structure of the language of deaf and hard of hearing on the basis of information theory of speech perception, *Information Technologies*, 2010, no. 2, pp. 60–66 (in Russian).
5. Denisova I. A. Game technologies as a condition of improving the quality of pronunciation of students with hearing impairments of primary school age, *Cherepovets Scientific Readings*, 2015, pp. 52–54 (in Russian).
6. Savchenko V. V. Speech recognition in background noise by the method of the phonetic words decoding, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2016, no. 9, pp. 9–16.
7. Zhang Y., Chan W., Jaitly N. Very deep convolutional networks for end-to-end speech recognition, *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2017 IEEE International Conference on, IEEE, 2017, pp. 4845–4849.
8. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep learning, MIT press, 2016, p. 781.
9. Savchenko A. V. Sequential three-way decisions in multi-category image recognition with deep features based on distance factor, *Information Sciences*, 2019, vol. 489, pp. 18–36.
10. Tao J., Ghaffarzadegan S., Chen L., Zechner K. Exploring deep learning architectures for automatically grading non-native spontaneous speech, *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2016, pp. 6140–6144.
11. Tresp V. Committee machines, Handbook for Neural Network Signal Processing, CRC Press, 2001, pp. 135–151.
12. Savchenko A. V. Adaptive Video Image Recognition System Using a Committee Machine, Optical Memory and Neural Networks (Information Optics), 2012, vol. 21, no. 4, pp. 219–226.
13. Hinton G. et al. Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition, *IEEE Signal processing magazine*, 2012, vol. 29, pp. 82–97.
14. Toth L. Combining Time-and Frequency-Domain Convolution in Convolutional Neural Network-Based Phone Recognition, *Proceedings of the Acoustics, speech and signal processing (ICASSP)*, 2014, pp. 190–194.
15. Sainath T. N., Mohamed A., Kingsbury B., Ramabhadran B. Deep Convolutional Neural Networks for LVCSR, *Proceedings of the Acoustics, speech and signal processing (ICASSP)*, 2013, pp. 8614–8618.
16. Sainath T. N., Parada C. Convolutional neural networks for small-footprint keyword spotting, *Sixteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association (ICASSP)*, 2015, pp. 1478–1482.
17. Liu W., Wen Y., Yu Z., Yang M. Large-margin softmax loss for convolutional neural networks, *ICML*, 2016, vol. 2, no. 3, p. 7.
18. Kittler J., Hatef M., Duin R., Matas J. On combining classifiers, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, vol. 20, no. 3, pp. 226–234.
19. Theodoridis S., Konstantinos K. Pattern recognition, Elsevier, 2008.
20. Savchenko A. V. The image as a set of samples of independent equally distributed values of features in the problems of recognition of complex structured objects, *Zavodskaya Laboratoriya*, 2014, vol. 80, no. 3, pp. 70 (in Russian).
21. Nakkiran P., Alvarez R., Prabhavalkar R., Parada C. Compressing deep neural networks using a rank-constrained topology, *Sixteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association (ICASSP)*, 2015, pp. 1473–1477.

В. Н. Костин, канд. техн. наук, доц., e-mail: vladimirkostin5@mail.ru,
Оренбургский государственный университет

Оценка потенциала опасности критически важных объектов при возникновении чрезвычайных ситуаций на основе информационно вероятностного метода и главных компонент

Рассматривается один из подходов к оценке значения потенциала опасности при возникновении чрезвычайной ситуации на критически важных объектах с использованием информационно вероятностного метода и главных компонент. Каждый категорируемый объект описывается множеством неоднородных характеристик опасности в виде частных видов потерь при возникновении чрезвычайной ситуации от воздействия нарушителей. Информация обрабатывается методом главных компонент, формируется матрица факторных нагрузок, на основе которой проводится анализ связей и значимости влияния частных видов потерь на потенциал опасности объекта. Переходя к матрице главных компонент категорируемых объектов, можно получить весовые значения вклада компонент в потенциал опасности объекта при возникновении чрезвычайной ситуации. Для каждой категории критически важных объектов на основе информационно вероятностного метода определен потенциал опасности и необходимый (требуемый) уровень защищенности от воздействия нарушителей. Полученные результаты могут использоваться при обосновании требований к уровню защищенности каждой категории критически важных объектов и определении базового типового нарушителя.

Ключевые слова: связь признаков, метод главных компонент, информационно вероятностный метод, потенциал опасности, энтропия

Введение

Одним из приоритетных направлений деятельности власти любого уровня является обеспечение безопасности и противодействие терроризму, так как это напрямую определяет ее авторитет и устойчивость. Актуальность исследований связана с возрастанием требований руководства страны к решению проблемы безопасности критически важных объектов (КВО).

Для оценки последствий воздействия нарушителей необходимо определить степень опасности объектов через частные виды и масштабы потерь, которые выражены в виде потенциалов опасности. Иными словами, необходимо оценить опасность каждой категории объектов при возникновении чрезвычайной ситуации (ЧС) от воздействия нарушителя. Данная задача решается для дифференцирования необходимых требований при определении степени защищенности КВО.

Данная задача рассматривалась в работах [1–4] при решении вопросов категорирования КВО по их потенциальной опасности при возникновении ЧС. При этом использовались в ос-

новном экспертные методы [1], где присутствует элемент субъективизма, или основы теории нечеткой логики и нечетких гиперграфов [2].

При анализе методики категорирования НПП "Иста-Системс" [1] вызывает сомнение использование линейной шкалы (от единицы до шести) для оценки масштабов частных видов потерь при возникновении ЧС. Методы исследований в источнике [2] не позволяют оценить связь частных видов потерь и их весовой вклад в формирование потенциала опасности объекта.

В работах [3, 4] для оценки опасности КВО были использованы многокритериальные оценки в виде перечневых классификаторов для определения категории опасности объекта. Оценка степени опасности выполняется по четырем категориям, что приводит к попаданию в одну категорию объектов со значимым различием потенциалов опасности.

В работе [5] проведен анализ всех методов определения опасности и в качестве наилучшей определена методика, представленная в работе [1]. Недостатком данной методики является

**Последствия ЧС для категоризируемых объектов
по шестибалльной шкале**

Частные виды потерь	Категория объекта						
	1	2	3	4	5	6	7
Политические	5	4	4	3	2	2	1
Людские	5	5	4	3	2	2	1
Финансовые	6	5	4	3	3	2	1
Экономические	6	5	4	3	3	2	1
Экологические	6	5	4	4	3	2	2
Информационные	6	5	5	4	3	2	2

использование шестибалльной линейной шкалы оценки масштабов потерь, что вызывает сомнения из-за узкого диапазона изменения и не согласованности с действительными характеристиками потерь при возникновении ЧС.

Среди зарубежных авторов М. Гарсия [6] рассматривает вопросы оценки рисков объектов при нарушении безопасности. Объекты защиты исследуются с позиции их структуры и характеристик для ответа на вопрос "что защищать?". Однако оценка потенциальной опасности объекта для определения критериев защищенности от действий нарушителей не проводится.

В данной статье предлагается на основе метода главных компонент (МГК) проанализировать связь между характеристиками частных видов потерь, формирующих потенциал опасности объекта при возникновении ЧС, и на основе информационно вероятностного метода (ИВМ) оценить энтропийный потенциал опасности каждой категории объектов. Достоинство предлагаемого решения заключается в обработке одной и той же информации разными математическими методами с последующим анализом результатов. Отличие предлагаемого подхода от имеющихся состоит в переходе от шестибалльной шкалы к энтропийной нелинейной шкале потерь в целях повышения достоверности оценки опасности КВО при возникновении ЧС. По результатам оценки опасности категорий можно предложить соответствующий уровень вероятности нахождения объекта в безопасном состоянии.

1. Постановка задачи

Необходимо на основе ИВМ и МГК оценить структурную связь характеристик опасности в виде частных потерь на КВО при возникновении ЧС и формализовать (интерпретировать) физический смысл содержания основных компонент матрицы нагрузок, определяющих потенциал опасности объекта. На основе полученной информации оценить потенциал опасности каждой категории объектов и предложить требуемый (необходимый) уровень их защиты.

2. Решение задачи

Результаты исследований, полученные в статье [7], являются исходными данными для решения задачи МГК. В табл. 1 представлены результаты оценок опасности последствий ЧС категоризируемых объектов в виде частных видов и масштабов потерь по шестибалльной шкале на основе методики НПП "Иста-Системс" [1].

В табл. 1 для оценки потенциальной опасности объекта введены шесть частных видов потерь и масштабов потерь, которые выражены потенциалами опасности [1]. Частные виды потерь:

- политические (определяются снижением всех уровней авторитета властей и общей нестабильностью);
- людские (потери жизни людей и их здоровья);
- финансовые (утрата материальных ценностей);
- экономические (учитывают затраты на переселение людей из зоны аварий и связанные с этим компенсационные выплаты);
- экологические (потери природных ресурсов, приводящие к ухудшению экологической обстановки в регионе);
- информационные (потери, заключающиеся в утрате художественных ценностей, передовых технологий, конфиденциальной информации).

Для каждого вида частных потерь задается уровень (масштаб) потенциальных потерь по шестибалльной шкале:

1 — локальный (ущерб в пределах территории объекта);

2 — местный (ущерб в пределах территории населенного пункта);

3 — территориальный (ущерб пределах территории субъекта РФ);

4 — региональный (ущерб в масштабе двух субъектов РФ);

5 — государственный (ущерб, в масштабе более чем двух субъектов РФ);

6 — межгосударственный (ущерб выходит за пределы РФ).

Шестибалльная шкала потерь является линейной функцией, что вызывает сомнение. Кроме того, значения в баллах масштаба потерь не отражает действительный уровень ущерба. Проведенные исследования в статье [8] определили каждому уровню потерь соответ-

Масштабы потерь при ЧС по шестибальной и энтропийной шкале

Оценочные шкалы	Масштаб потерь					
	Локальный	Местный	Территориальный	Региональный	Государственный	Межгосударственный
Пострадало людей	Не более 10	Не более 50	Не более 50	Свыше 50, но не более 500	Свыше 50, но не более 500	Свыше 500
Размер материального ущерба (млн руб.)	Не более 0,1	Не более 5	Не более 5	Свыше 5, но не более 500	Свыше 50, но не более 500	Свыше 500
Масштаб частных видов потерь по шестибальной шкале	1	2	3	4	5	6
Энтропийная шкала (H)	0,007	0,116	0,173	0,555	0,621	0,878

ствующую энтропийную (H) величину ущерба, которая имеет нелинейный характер, кроме того, минимальный и максимальный масштаб потерь отличается не в шесть раз, а на два порядка. Это более соответствует действительной ситуации. Результаты энтропийной оценки масштаба потерь приведены в табл. 2 и рис. 1 (см. третью сторону обложки).

В табл. 1 перейдем от шестибальной к энтропийной шкале опасности и получим результаты, представленные в табл. 3.

Для определения системных связей между частными видами потерь матрицы наблюдений использовался один из главных методов факторного анализа — МГК [9]. МГК позволяет на основе данных корреляционной матрицы разделить совокупность ортогональных векторов (компонент) или направлений по числу рассматриваемых переменных. Указанные векторы соответствуют собственным векторам и собственным значениям корреляционной матрицы. В МГК собственные значения выделяются в порядке убывания, что существенно для описания данных в случае использования лишь незначительного числа компонент.

МГК ориентирован на дисперсии. Хотя несколько компонент могут выделить большую часть суммарной дисперсии переменных, однако для точного воспроизведения корреляции между переменными требуются все компоненты.

Результаты компонентного анализа потенциально опасных объектов по исходным данным табл. 3 приведены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что все виды частных потерь объединились в первой компоненте — интерпретируем ее как "потенциал опасности" объекта при возникновении ЧС. Первая ком-

Таблица 3

Последствия ЧС для категорируемых объектов по энтропийной шкале

Частные виды потерь	Категория объекта						
	1	2	3	4	5	6	7
Политические	0,621	0,555	0,173	0,173	0,116	0,116	0,007
Людские	0,621	0,555	0,555	0,173	0,116	0,116	0,007
Финансовые	0,621	0,621	0,555	0,173	0,116	0,116	0,007
Экономические	0,878	0,621	0,555	0,173	0,116	0,116	0,007
Экологические	0,878	0,621	0,555	0,173	0,173	0,116	0,116
Информационные	0,878	0,621	0,555	0,173	0,173	0,116	0,116

Таблица 4

Оценка характеристик объектов по матрице факторных нагрузок

Частные виды потерь	Факторные нагрузки					
	F_1 потенциал опасности	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
Политические	0,987	-0,115	-0,061	0	0,031	0
Людские	0,990	-0,152	0,15	-0,103	-0,039	0
Финансовые	0,987	-0,135	-0,031	0,067	-0,018	0
Экономические	0,987	-0,135	-0,08	-0,062	0,062	0
Экологические	0,952	0,291	-0,134	0	-0,076	0
Информационные	0,960	0,262	0,133	0,088	0,014	0

понента составляет 78 % информационной нагрузки, вторая 10 %. Остальные компоненты малозначимы.

Перейдем от матрицы факторных нагрузок к матрице главных компонент категорируемых объектов (табл. 5).

Из табл. 5 видно, что все категории объектов по первой компоненте расположились по убыванию привлекательности относительно начало координат. По первой компоненте F_1

Таблица 5

Оценка категорируемых объектов по факторным нагрузкам

Категории объектов	Энтропийный потенциал опасности	Факторные нагрузки					
		F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
1	0,584	1,625	0,034	-0,443	0,269	1,47	0
2	0,471	1,021	-0,538	-0,149	0,558	-1,9	0
3	0,443	0,629	-0,203	1,825	0,612	0,086	0
4	0,355	-0,406	2,385	-1,515	-0,653	-0,155	0
5	0,122	-0,877	-0,56	0,384	-1,701	0,06	0
6	0,082	-0,953	-0,706	-0,102	1,515	0,44	0
7	0,053	-1,039	-0,412	-0,201	0,073	-0,179	0

наиболее привлекательными являются объекты первой и второй категории. Седьмая категория самая не привлекательная.

В табл. 5 с помощью информационно вероятностного метода [7] по факторным нагрузкам F_1 и F_2 оценили энтропийный потенциал опасности категорируемых объектов. Уровень опасности при возникновении ЧС на категорируемых объектах носит нелинейный логарифмический характер (рис. 2, см. третью сторону обложки). Анализ результатов показывает, что математический аппарат адекватно отражает физическую сущность категорий объектов.

Соотношения степени опасности между максимальной и минимальной категориями объекта составляет порядка тринадцати раз. Это более логичный результат, чем в методике оценки опасности категорируемых объектов у авторов работы [1], которые оценивают соотношение потенциалов только в шесть раз. Ре-

зультат при использовании энтропийных оценок опасности последствий [8] является более точным.

Степень опасности категорируемых объектов в виде энтропийного потенциала опасности также можно оценить по входным данным из табл. 3, а результаты оценки энтропийного потенциала каждой категории представлены в табл. 6. Из табл. 6 видно, что потенциал опасности объектов первой категории превышает потенциал шестой категории объектов почти в 13 раз. Результаты согласуются с МГК, однако информационно вероятностный метод в отличие МГК использует 100 % информации.

Показателем защищенности объекта выберем вероятность его безопасного состояния. Имея потенциалы опасности категорируемых объектов, можно определить показатель их защищенности (вероятность безопасного состояния) как функцию потенциала опасности. Иными словами, требуется обосновать шкалу критерия эффективности системы физической защиты в зависимости от категории объекта. Очевидно, должно быть соответствие между потенциалом опасности категории и степенью его защищенности, т.е. характер изменения зависимостей должен быть подобный. Функцию изменения энтропийных потенциалов от номера категории свяжем с требуемым значением вероятности безопасного состояния по первой категории (за верхнюю оценку принято значение вероятности защиты 0,95 — величина, близкая к предельной) и последней категории (чувствительность датчика обнаружения — 0,65 и вероятность своевременной нейтрализации 0,9). Таким образом, сопоставим каждой категории требуемую защищенность. Характер изменения энтропии опасности объектов и их вероятности безопасного состояния, как подобные величины, приведены в табл. 6 и на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

Анализ графиков показывает нелинейный характер зависимости потенциала опасности категорируемых объектов и соответствующего им показателя вероятности безопасного состояния объектов.

Заключение

При системном анализе КВО — интегральной характеристикой категорируемых объектов, определяющих их привлекательность, является потенциал опасности объекта при возникновении ЧС. Характеристики частных потерь определяют потенциал опасности категории объектов, который формирует потенциал

Таблица 6

Энтропийный потенциал и вероятность безопасного состояния объекта

Категория объекта	Энтропийный потенциал опасности	Вероятность P безопасного состояния объекта
1	1,371	0,95
2	1,182	0,90
3	1,011	0,86
4	0,422	0,69
5	0,249	0,65
6	0,206	0,63
7	0,102	0,60

ее привлекательности. Потенциал опасности первой категории КВО превосходит седьмую категорию в тринадцать раз. Распределение потенциалов опасности категорий КВО носит нелинейный характер, следовательно, и распределение показателей их защищенности носит нелинейный характер. Полученные результаты могут использоваться при принятии решений обоснованных требований к безопасности категоризируемых объектов.

Список литературы

1. Бояринцев А. В., Бражник А. Н., Зуев А. Г. Проблемы антитерроризма: Категорирование и анализ уязвимости объектов. СПб.: ЗАО "ИСТА — Системс", 2006. 252 с.
2. Боровский А. С., Тарасов А. Д. Автоматизированное проектирование и оценка систем физической защиты потенциально опасных (структурно сложных) объектов. Часть 1. Системный анализ проблемы проектирования и оценки

систем физической защиты. Самара; Оренбург: СамГУПС, 2012. 155 с.

3. Зуев А. Г. Категорирование потенциально опасных объектов как основа создания эффективных систем обеспечения безопасности // Системы безопасности. 2002. № 3 (45).
4. Вишняков С. М. Функциональная опасность, безопасность и значимость объектов. Часть 1 // Системы безопасности. 2006. № 2. Часть 2 // Системы безопасности. 2006. № 3.
5. Панин О. А. Категорирование объектов для создания эффективных систем физической защиты // БДИ. 2007. № 1. С. 70.
6. Гарсия М. Проектирование и оценка систем физической защиты: Пер. с англ. М.: ООО "Издательство АСТ", 2002. 386 с.
7. Костин В. Н. Информационно вероятностный метод формирования категорий потенциально опасных объектов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 6(132). С. 43—56.
8. Костин В. Н. Оценка величины значимости чрезвычайных ситуаций на основе информационно вероятностной модели // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 3. С. 21—32.
9. Харман Г. Современный факторный анализ. М.: Статистика, 1972. 447 с.

V. N. Kostin., Cand. of Tech. Sc., Associate Professor, e-mail: vladimirkostin5@mail.ru,
Department of Software for Computer Engineering and Automated Systems (POVTAS),
Faculty of Mathematics and Information Technology, Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

Assessment of the Hazard Potential of Critical Facilities during Emergency Situations Based on Information Probabilistic Method and Principal Components

One of the approaches to assessing the magnitude of the hazard potential in emergency situations at critical facilities using the information-probabilistic method and the main components is considered. Each categorized object is described by a variety of heterogeneous hazard characteristics in the form of private types of losses in the event of emergencies from the impact of violators. The information was processed by the principal component method, a matrix of factor loads was formed, on the basis of which an analysis was made of the relationships and the significance of the influence of particular types of losses on the hazard potential of the facility. Moving to the matrix of the main components of categorized objects, we obtained weighted values of the contribution of the components to the hazard potential of the object in case of emergency. For each category of critical objects, on the basis of the probabilistic information method, the hazard potential and the necessary (required) level of protection from the influence of violators are determined. The results can be used to justify the requirements for the level of security of each category of critical objects and determine the basic type of intruder.

Keywords: connection of signs; principal component method, probabilistic information method, hazard potential, entropy

DOI: 10.17587/it.26.297-301

References

1. Boyarintsev A. V., Brazhnik A. N., Zuyev A. G. Problemy antiterrorizma: Kategorirovaniye i analiz uyazvimosti ob'yektov, SPb., ZAO "ISTA — Sistems", 2006, 252 p. (in Russian).
2. Borovskiy A. S., Tarasov A. D. Avtomatizirovannoye proyektirovaniye i otsenka sistem fizicheskoy zashchity potentsial'no opasnykh (strukturno slozhnykh) ob'yektov. Chast' 1. Sistemnyy analiz problemy proyektirovaniya i otsenki sistem fizicheskoy zashchity, Samara, Orenburg, SamGUPS, 2012, 155 p. (in Russian).
3. Zuyev A. G. *Sistemy bezopasnosti*, 2002, no. 3 (45) (in Russian).

4. Vishnyakov S. M. Functional danger, safety and significance of objects. Part 1, *Sistemy Bezopasnosti*, 2006, no. 2; Part 2, *Sistemy Bezopasnosti*, 2006, no. 3 (in Russian).
5. Panin O. A. *BDI*, 2007, no. 1, p. 70.
6. Garsia M. Design and evaluation of physical protection systems, Moscow, Mir, ООО "Izdatel'stvo AST", 2002, 386 p. (in Russian).
7. Kostin V. N. *Vestnik komp'yuternykh i informa-tsionnykh tekhnologiy*, 2015, no. 6(132), pp. 43—56 (in Russian).
8. Kostin V. N. *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternyye sistemy*, 2019, no. 3, pp. 21—32 (in Russian).
9. Kharman G. Modern factor analysis, Moscow, Statistika, 1972, 447 p. (in Russian).

А. И. Миков, д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры информационных технологий,
e-mail: Alexander_Mikov@mail.ru,

Кубанский государственный университет, г. Краснодар,

Е. Б. Замятина, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры информационных технологий в бизнесе,
e-mail: ezamyatina@hse.ru,

Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", г. Пермь,

С. М. Калашников, студент,

Пермский государственный национальный исследовательский университет

Исследования алгоритмов маршрутизации в SON сетях с использованием программных средств имитационного предсказательного моделирования¹

Представлены результаты исследования одного из алгоритмов маршрутизации в ad-hoc сетях, а именно, в SON (самоорганизующихся сетях, от англ. self-organizing network), методом имитационного моделирования. Рассматриваются разновидности ad-hoc сетей и особенности реализации алгоритмов маршрутизации в этих сетях. Внимание сфокусировано на инструментальных средствах имитационного моделирования, указываются требования к программным средствам подобного рода, приводятся конструкции языка имитационного моделирования Triad. Моделирование выполняется в инструментальной среде TriadNS, разработанной авторами.

Ключевые слова: ad-hoc сети, SON, алгоритмы маршрутизации, имитационное моделирование, язык имитационного моделирования

Введение

Классическая ad-hoc сеть представляет собой динамическую мобильную сеть без четкой инфраструктуры, которая формируется автоматически в результате возникающих соединений между мобильными узлами. Набор этих мобильных узлов располагается в некоторой области и характеризуется тем, что центральный управляющий узел отсутствует. Каждый узел ad-hoc сети может функционировать как маршрутизатор, организуя и поддерживая процесс маршрутизации как к другим узлам в той же сети, так и к устройствам, которые являются передатчиками или приемниками. Узлы могут выполнять как пересылку данных, так и выполнять работу, связанную с конкретным назначением сети.

К особенностям ad-hoc сетей можно отнести также динамически изменяющиеся топологии и ограниченные энергетические ресур-

сы. Узлы сети могут изменять свое местоположение, условия распространения сигнала также могут меняться. Более того, может изменяться полоса пропускания и зона видимости радиосигнала.

Цели, для которых используют ad-hoc сети, могут быть самыми разнообразными. Известно, что ad-hoc сети могут быть использованы структурами МЧС, в транспортных системах, БПЛА (беспилотными летательными аппаратами) и т.д., нередко в тех ситуациях, когда надо развернуть сеть на некоторое время для передачи данных.

В настоящее время существует большое число систем имитационного моделирования для проектирования и анализа компьютерных сетей. Эти системы моделирования можно разделить на специализированные (COMNET [1], OMNet++ [2], OPNET [3], NS-2 [13] и т.д.) и системы моделирования общего назначения (к примеру, ANYLOGIC [4]).

Авторы представляют в статье инструментальные средства автоматизированного проек-

¹Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-01-00359.

тирования и имитационного моделирования TriadNS[5,6]. Одной из особенностей TriadNS является способ представления имитационной модели в виде трех слоев: слоя структур (вычислительные узлы и линии связи компьютерной сети), слоя рутин (описывает поведение вычислительных узлов), слоя сообщений (описание сообщений и данных сложной структуры, предполагается, что вычислительные узлы обмениваются сообщениями).

Для описания имитационной модели в TriadNS используют язык Triad [7, 8], синтаксические конструкции языка будут представлены ниже.

Далее статья организована следующим образом: в первом разделе описаны особенности самоорганизующихся сетей (SON), во втором разделе рассмотрены динамические графы, которые являются математической моделью SON. Далее обсуждается система моделирования TriadNS и результаты эксперимента.

Самоорганизующиеся сети (SON)

Один из подходов к классификации беспроводных сетей предполагает их разделение на сети с централизованной инфраструктурой и самоорганизующиеся сети. Особенностью SON [9, 10] является их способность при отсутствии централизованной инфраструктуры организовывать обмен информацией между любыми двумя вычислительными узлами в зоне радиопокрытия.

Как уже отмечалось ранее, вычислительные узлы в SON можно разделить на конечные хосты и маршрутизаторы. Соединения между конечными узлами-хостами организуются на длинные расстояния через промежуточные узлы-маршрутизаторы с помощью специальных протоколов маршрутизации. Такое соединение называют "многошаговым" или "многоэтапным" (multi-hop). Каждый шаг — это участие одного из узлов-маршрутизаторов сети в передаче данных от одного узла до другого. Вычислительные узлы сети обладают способностью находить друг друга, чтобы обеспечить передачу данных и формировать сеть. В случае выхода из строя одного из узлов вычислительные узлы SON организуют новые пути для передачи данных.

К классу самоорганизующихся сетей можно отнести:

- а) беспроводные мобильные ad-hoc сети (MANET) [15—17, 25, 26];
- б) беспроводные сенсорные сети (WSN) [13, 14, 23];

- с) беспроводные ячеистые сети (WMN) [13];
- д) оппортунистические сети WSN DTN (ODTN, Opportunistic Delay Tolerant Networks) [21];
- е) автотранспортные ad-hoc сети (VANET) [18—20];

- ф) гетерогенные ad-hoc сети (HANET) [12];
- г) ad-hoc сети для летательных аппаратов (FANET) [11, 24].

SON могут быть использованы:

- а) в системах безопасности;
- б) для мониторинга оборудования;
- в) в интернете вещей.

Итак, как уже упоминалось ранее, вычислительные узлы SON сетей могут устанавливать новые маршруты для передачи данных, таким образом, координаты вычислительных узлов могут динамически изменяться.

Структура классических проводных сетей может быть представлена виде графа $G = (V, E)$, где V — множество вершин (вычислительных узлов сети), E — множество ребер (дуг) (линии связи между вычислительными узлами).

SON могут быть описаны с помощью динамических геометрических графов. Рассмотрим их более подробно.

Динамические геометрические графы

Геометрический граф — это набор $GG = \{V; R; P; r\}$, где V — множество вершин; R — ориентированная ограниченная поверхность, на которой располагаются вершины; P — отображение, $P: V \rightarrow R$ (геометрическая конфигурация — локализация вершин); r — числовой параметр, интерпретируемый как радиус действия приемопередатчиков компьютерных узлов сети. Геометрический граф является математической моделью гомогенной беспроводной компьютерной сети, его вершины соответствуют узлам сети.

В мобильных компьютерных сетях вершины перемещаются в области R , поэтому их модели являются динамические геометрические графы $DGG = \{V; R; T; S; r\}$, где T — упорядоченное множество чисел, обычно интерпретируемое как множество моментов времени; S — отображение, $S: V \times T \rightarrow R$ (поток геометрических конфигураций — локализации вершин) [27, 28]. В динамическом геометрическом графе ad-hoc сети координаты узлов, определяемые отображением S , как правило, являются непрерывными функциями времени.

Для решения задач маршрутизации сообщений модель динамического геометрического графа является в некотором смысле избыточной. Например, смещение всех вершин

в одном направлении на одинаковое расстояние никак не влияет на выбор оптимального маршрута. Изотропное изменение размера области с соответствующим изменением величины r , а также масштаба временной оси также сохраняет свойства маршрутов. Поэтому для решения задач, поставленных в статье, целесообразно построить отображение множества динамических геометрических графов сетей в семейства обыкновенных графов. Для этого фиксируем некоторый момент времени $t \in T$, выбирая одну геометрическую конфигурацию из потока. Она определяет расстояния между вершинами, часть из которых меньше r . Соответствующие пары узлов сети "слышат" друг друга, следовательно, в обыкновенном графе $G(t)$ между ними имеется ребро, которое можно использовать для построения маршрутов передачи данных. Переход к новому моменту времени $t + \Delta t$ может не изменить ситуации, и обыкновенный граф $G(t + \Delta t)$ останется таким же, $G(t + \Delta t) = G(t)$, либо граф изменится. Хотя отображение S непрерывно, изменение графа $G(t)$ во всех случаях дискретно, т.е. динамический граф DGG сводится к последовательности $G_0, G_1, G_2, \dots, G_i, \dots$ обыкновенных графов.

Такой подход позволяет естественным образом вводить классы динамических геометрических графов, определяя их на основе свойств обыкновенных графов.

Назовем динамический геометрический граф *связным на интервале* $[a, b]$, если он отображается в такое семейство $\{G_i\}$, что все обыкновенные графы $G(t)$, $a \leq t \leq b$, связны.

Назовем динамический геометрический граф *стабильным на интервале* $[a, b]$, если он отображается в такое семейство $\{G_i\}$, что все обыкновенные графы $G(t)$, $a \leq t \leq b$, изоморфны.

Если перемещение узлов мобильной компьютерной сети заранее неизвестно, непредсказуемо, то используется математическая модель случайного геометрического графа. В этой модели позиции вершин в графе G_0 (геометрические конфигурации) считаются случайными векторами с заданным распределением вероятностей. В исследовании, как правило, для всех вершин задается одно и то же распределение, для ограниченной области расположения вершин сети — равномерное.

В динамических случайных геометрических графах происходит перемещение вершин, а в соответствующей сети — перемещение узлов, в результате которого изменяются условия приема и передачи сигналов. При сближении двух узлов уровень сигнала становится достаточным для установления двусторонней связи, при удалении узлов друг от друга связь

теряется. Это происходит в случайные моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots$, поэтому последовательности $G_0, G_1, G_2, \dots, G_i, \dots$ обыкновенных графов можно рассматривать как реализации случайного процесса. При указанных выше предположениях о распределениях вероятностей поток событий "изменение обыкновенного графа" является ординарным, две пары вершин не могут одновременно приобрести ребро или лишиться ребра, поэтому соседние графы в последовательности $\{G_i\}$ отличаются в точности одним ребром.

Представляют практический интерес следующие постановки проблем для динамических геометрических графов при различных условиях:

1) ограничения среды R . Варианты ограничений:

- среда представляет собой односвязную выпуклую область (например, круг, прямоугольник); нет ограничений, перемещение возможно в любом направлении;
- среда представляет собой совокупность одномерных криволинейных пересекающихся отрезков; перемещение узлов по ребрам (или дугам) заданного графа — сети маршрутов на местности;
- среда представляет собой многосвязную область; перемещение в обход запретных или труднодоступных областей, для движения в которых нужно разрешение или специальное оборудование;

2) решение задачи Q распределенным алгоритмом A . В процессе решения задачи участвуют все узлы сети. Первоначально сеть $N(t_0)$ связна, что позволяет начать решение задачи. В результате перемещения узлов в момент t_1 сеть $N(t_1)$ становится несвязной. Может быть несколько вариантов продолжения:

а) алгоритм A решил задачу Q к моменту времени t_1 ;

б) алгоритм A не завершен к моменту времени t_1 и продолжит свою работу в момент времени t_2 (восстановления связности сети);

в) алгоритм A не завершен и может возобновить свою работу в момент t_2 с частичной потерей выполненной ранее работы (с некоторой контрольной точки);

г) алгоритм A не завершен, и его исполнение начинается заново в момент времени t_2 восстановления связности сети ввиду неактуальности прежних исходных данных;

д) алгоритм A продолжает свою работу в промежутке времени от t_1 до t_2 в k компонентах сети, но в момент t_2 должно происходить согласование частичных решений, на которое требуется время, зависящее от числа компонент.

Потеря связности сети приводит к одному из следующих последствий:

- невозможности решения задачи Q алгоритмом A ;
- снижению эффективности, задержкам решения задачи Q алгоритмом A ;
- снижению безопасности для сети N при решении задачи Q алгоритмом A ;
- вероятной потере отдельных узлов сети N , оказавшихся изолированными, и постепенному уничтожению сети N (например, при боевых действиях).

Для того чтобы полноценно использовать динамические графы в построении ad-hoc сети, вершины должны использовать некоторые алгоритмы маршрутизации, представленные в следующем разделе.

Рассмотрим особенности реализации алгоритмов маршрутизации в ad-hoc сетях. Существует большое число алгоритмов для классических проводных сетей. Поскольку беспроводные сети не имеют централизованной инфраструктуры, применение классических алгоритмов не является эффективным. Алгоритмы маршрутизации, применяемые в ad-hoc сетях, можно разделить по топологическим свойствам на топологические (учитываются связи между вычислительными узлами сети) и географические (используются географические координаты вычислительных узлов). Согласно принципам функционирования алгоритмы маршрутизации делятся на проактивные, реактивные и гибридные.

Если учитывать наилучшие маршруты, алгоритмы маршрутизации могут быть разделены на алгоритмы вектора расстояния (вектор расстояния, шагов) и алгоритмы со сложными метриками (используют оценку маршрутов по нескольким параметрам) [23].

Итак, существует несколько различных типов ad-hoc сетей, однако их особенности следует учитывать при разработке алгоритмов маршрутизации. Далее рассмотрим более подробно алгоритмы маршрутизации в оппортунистических сетях [21].

Алгоритмы маршрутизации

Рассмотрим более подробно *алгоритмы маршрутизации в оппортунистических сетях без инфраструктуры*.

Маршрутизация на основе рассылки [29]. Методы маршрутизации на основе рассылки выполняют доставку сообщения по назначению, просто распространяя его по всей сети.

Эвристика, лежащая в основе этой политики, заключается в том, что поскольку нет сведений о возможном пути к месту назначения или сведений о соответствующем узле следующего перехода, сообщение следует отправлять повсюду. Оно в конечном итоге достигнет места назначения путем передачи от одного узла к другому. Методы, основанные на распространении, очень ресурсоемки. Кроме того, из-за значительного числа передач методы на основе распространения страдают от высокого уровня конкуренции и могут потенциально привести к перегрузке сети.

Чтобы увеличить пропускную способность сети, радиус распространения сообщения обычно ограничивают введением максимального числа ретрансляционных переходов для каждого сообщения или даже путем ограничения общего числа копий сообщений, присутствующих в сети в одно и то же время. Если ретрансляция дальше не разрешена, узел может отправлять сообщение только непосредственно получателю при встрече, если таковая происходит.

Маршрутизация на основе сетевого кодирования. Маршрутизация на основе сетевого кодирования [30] также относится к категории алгоритмов, основанных на распространении данных, но использует собственный подход для ограничения потока сообщений. Сообщения перед отправкой объединяются (кодируются) в узлах. Затем полученные коды отправляются вместо исходных сообщений. Коды распространяются в разных направлениях, как и в других протоколах маршрутизации, основанных на рассылке. Число генерируемых кодов выше, чем число оригинальных сообщений вместе взятых. Это необходимо, чтобы обеспечить большую устойчивость к потерям пакетов и путей. Кодирование выполняется как на исходном, так и на промежуточном узлах.

Далее рассмотрим *алгоритмы маршрутизации в оппортунистических сетях на базе инфраструктуры*.

Маршрутизация на основе контекста. В протоколе Context-Aware Routing (CAR) [31] каждый узел в сети отвечает за создание таких показателей, как вероятность доставки к каждому известному узлу назначения. Происходит периодический обмен вероятностями доставки, так что, в конечном счете, каждый узел может вычислить лучшего оператора для каждого узла назначения. Лучшие операторы вычисляются на основе контекста узлов. Среди атрибутов контекста, необходимых для выбора лучшего носителя, есть, например, остаточный уровень заряда батареи, скорость изменения связности, вероятность быть в пределах досягаемости места назначения, степень

мобильности. Когда лучший оператор получает сообщение для пересылки, он сохраняет его в локальном буфере и, в конечном счете, пересылает его на узел назначения, если таковой доступен, или же другому узлу с более высокой вероятностью доставки.

В *MobySpace Routing* [32] показатели мобильности узлов представляют контекстную информацию, используемую для маршрутизации. Протокол создает многомерное евклидово пространство по имени MobySpace, где каждая ось представляют собой возможный контакт между двумя узлами, а расстояние вдоль оси служит мерой вероятности этого контакта. Два узла, которые имеют похожие наборы контактов и вероятности связи с ними, близки в MobySpace. Лучшим узлом пересылки для сообщения является узел, который находится на минимальном расстоянии к месту назначения в этом пространстве. Это увеличивает вероятность того, что сообщение в конечном итоге достигнет пункта назначения. Очевидно, что в вышеописанном виртуальном контактном пространстве знание всех осей пространства также требует знания всех узлов, которые циркулируют в пространстве (в работе [30] предлагается оптимизация, которая не требует знания всех контактов между узлами).

Алгоритм перемещения на основе кодов с избыточностью. Общая идея — это кодирование с избыточностью [29]. Коды избыточности работают путем преобразования сообщения в больший набор кодовых блоков, так что любое достаточно большое подмножество генерируемых кодовых блоков может быть использовано для восстановления исходного сообщения.

Для более точной реализации алгоритма можно использовать агентное моделирование, иными словами, узлы сети будут являться интеллектуальными агентами, которые будут самостоятельно принимать решение о пересылках сообщений.

Система имитационного моделирования и автоматизированного проектирования TriadNS

Система имитационного моделирования (СИМ) TRIadNS [5] была разработана на основе системы автоматизированного проектирования и моделирования TRIAD [6, 7].

Рассмотрим представление имитационной модели в TriadNS и представим лингвистические конструкции, предназначенные для описания компьютерных сетей. Имитационная модель в TriadNS представлена несколькими объектами, функционирующими в соответ-

ствии с некоторым сценарием и взаимодействующими друг с другом путем отправки сообщений. Вычислительные узлы сети и взаимосвязи между ними могут быть описаны на языке Triad [22] в слое структур. Следует отметить, что имитационная модель в Triad может быть представлена тремя слоями. Основным является слой структур. Структура компьютерной сети обычно представлена графом $G(V, E)$, где V — множество вершин (вычислительные узлы сети); E — ребра (дуги) между вершинами (линии связи между вычислительными узлами).

Поведение вычислительных узлов описывают в слое рутин. Третий уровень — это слой сообщений. Он предназначен для описания сообщений со сложными структурами данных.

Лингвистическая конструкция для описания структуры компьютерной сети представлена ниже:

structure <имя структуры> *def* (<список общих параметров>) (<список входных и выходных параметров>) <описание списка переменных> <оператор> *endstr*

Входные и выходные параметры связаны с входными и выходными полюсами объекта, представляющего компьютерный узел сети. Действительно, каждый компьютерный узел может отправлять сообщение s через выходные полюсы на другой узел и получать сообщения через входные полюсы. Каждый объект может быть описан (расшифрован) структурой нижнего уровня. Таким образом, имитационная модель является иерархической.

Вычислительные узлы компьютерной сети действуют по определенному сценарию. Сценарий описывают с помощью лингвистических и программных средств (процедур, которые называют еще "рутинами") слоя рутин. Каждая процедура задается множеством событий E , линейно упорядоченным множеством временных моментов (T) и набором состояний $\{Q\}$. Состояние задается значениями локальных переменных. Локальные переменные определяются в рутине. Состояние изменяется только в случае возникновения события. События планируют друг друга (*schedule* (event1, t1) — процедура планирования события event1 на момент времени t1). В рутине могут быть определены входные и выходные полюсы (Pr_{in} и Pr_{out}). Входной полюс служит для приема сообщений, выходные полюсы — для их отправки. Среди множества событий выделяют входные сообщения. Все входные полюсы обрабатываются входным событием, выходные полюсы — обычным событием. Специальный оператор

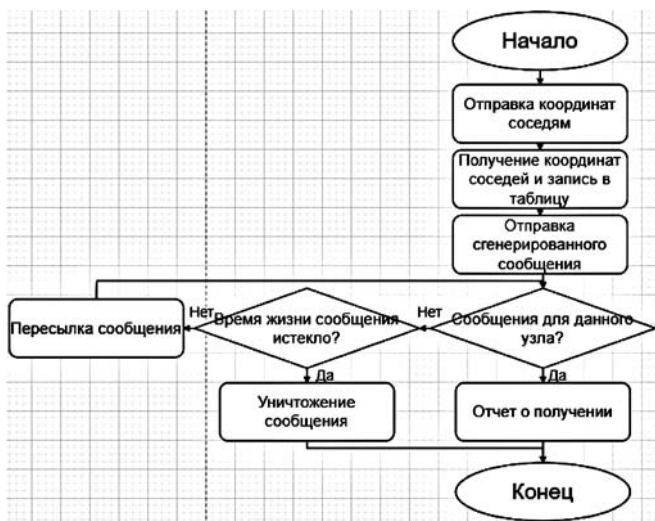


Рис. 1. Блок-схема алгоритма маршрутизации на основе рассылки

(*out* <сообщение> *through* <имя полюса>) служит для отправки сообщения.

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма маршрутизации на основе рассылки.

Сценарий имитационного эксперимента, критерии завершения имитационного запуска определяют в лингвистической конструкции "условия моделирования". Входными параметрами является список элементов имитационной модели (переменные, события, входные и выходные сообщения), которые необходимо изучить и обработать во время выполнения имитации с помощью информационных процедур. Список информационных процедур, которые используют для обработки элементов имитационной модели, включают в условия моделирования. Условия моделирования и информация о процедурах представляют собой "алгоритм исследования".

Система моделирования TriadNS включает также набор стандартных информационных процедур.

Кроме того, на языке Triad пользователь имеет возможность написать свой собственный алгоритм обработки элементов модели в ходе имитационного эксперимента.

Исследование слоя структур является только статическим процессом. Процесс моделирования может происходить только после определения поведения всех узлов модели в структурном слое. Прогон имитационного эксперимента инициализируется оператором *simulate*:

Simulate < список моделей > ***on condition of simulation*** < имя условия моделирования > (<параметры настроек>) (< параметры интерфейса >) (< список информационных процедур >; < последовательность операторов >).

Следует отметить, что одним оператором *simulate* можно запустить сразу несколько моделей.

Кроме того, можно выполнить моделирование с разными "условиями":

- предположим, что пользователь хочет разработать компьютерную сеть. Для этого необходимо определить структуру компьютерной сети и характеристики рабочих станций и других устройств компьютерной сети;
- предположим, что пользователь хочет определить конфигурацию компьютерной сети и технические характеристики самой дешевой сети, более эффективной сети, более надежной и т. д. Для этого необходимо определить разные критерии во время моделирования, и можно сделать это, используя различные "условия моделирования". Теперь продемонстрируем способность TriadNS для разработки и анализа алгоритма маршрутизации на основе рассылки.

Реализация алгоритма маршрутизации оппортунистических сетей в TriadNS

Итак, для моделирования алгоритмов маршрутизации в оппортунистических компьютерных сетях была выбрана СИМ TriadNS. Напомним алгоритм маршрутизации, который мы будем исследовать.

Каждый узел, отправляя свое сообщение, рассылает его всем ближайшим узлам. Ближайшие узлы выполняют однотипные действия, они рассылает сообщения во все узлы, исключая исходный отправляющий узел и узел, из которого было отправлено сообщение (если это разные узлы). Таким образом, в определенный момент времени все копии сообщения должны быть у получателя. Если копии не доходят до получателя, они уничтожаются по истечении их времени жизни. Время жизни — число возможных пересылок сообщений. Время жизни указывается во входных параметрах и обязательно должно быть общим для всех узлов.

Представим результаты тестирования алгоритма.

Прежде всего, необходимо определить входные параметры: координаты конкретного узла, идентификатор этого узла, радиус видимости, время жизни сообщения.

Рассмотрим тест № 1 (рис. 2). Пусть в сети в передаче сообщений участвуют четыре узла, радиус видимости которых позволяет им достичь только двух других узлов. Время жизни сообщения в этом случае — только одна пересылка.

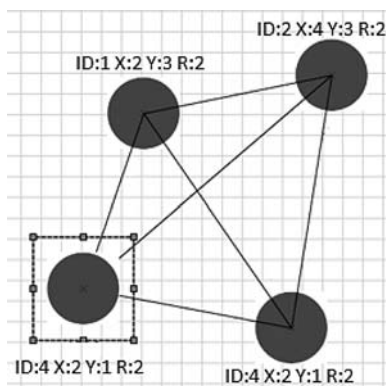


Рис. 2. Тест № 1. Отслеживание сообщений при выполнении алгоритма маршрутизации на основе рассылки. Число узлов — 4

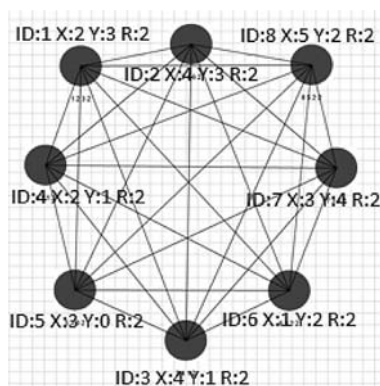


Рис. 3. Тест № 2, 3. Отслеживание сообщений при выполнении алгоритма маршрутизации на основе рассылки. Число узлов — 8

Результат теста № 1 были зафиксированы в журнале. Анализ записей в журнале показал, что многие сообщения являются "мертвыми", только небольшая часть сообщений была доставлена в нужное место.

Тест № 2 является более сложным: имеется восемь узлов, и каждый узел видит три других узла. Срок службы сообщения остается таким же, как в предыдущем примере — одна пересылка (рис. 3).

Анализ результатов эксперимента показал, что увеличился разрыв между отправкой сообщения и его прибытием, а также увеличилось число уничтоженных сообщений.

В тесте № 3 число узлов было таким же, что и во втором тесте, но время жизни сообщений было увеличено. В этом случае время жизни равно времени двух пересылок. Результат эксперимента свидетельствует о том, что число сообщений, отправленных с одного узла на другой, увеличивается при увеличении срока службы сообщений.

На основе трех испытаний можно сделать вывод, что при увеличении числа узлов следует увеличить жизненный цикл сообщения, чтобы сообщения достигли цели с высокой степенью надежности.

Заключение

В статье кратко представлены компьютерные сети нового поколения, а именно самоорганизующиеся сети (SON), и несколько алгоритмов, предназначенных для реализации передачи данных в самоорганизующихся сетях.

В качестве модели самоорганизующихся сетей используют динамические геометрические графы; в самоорганизующихся сетях геогра-

фические координаты вычислительных узлов могут изменяться.

Для исследования эффективности алгоритмов маршрутизации авторы предлагают использовать разработанное ими программное обеспечение — симулятор компьютерных сетей TriadNS и высокоуровневый язык Triad.

Симулятор компьютерных сетей имеет ряд особенностей, которые позволяют строить сложные структуры сетей, задавая графовые константы (соответствуют основным топологиям компьютерных сетей) и выполняя операции над структурой модели (добавление вершины или ребра, удаление вершины или ребра, объединение графов, пересечение графов и т.д.). Алгоритм построения структуры сети записывают с помощью параметризованной процедуры. Использование этой процедуры позволяет сгенерировать соответствующую структуру сети с произвольным числом узлов.

Наряду с лингвистическими средствами описания структур исследователь имеет возможность описать функционирование вычислительных узлов, разработать сценарий проводимых исследований, используя информационные процедуры и условия моделирования (информационные процедуры собирают и обрабатывают необходимые данные, а условия моделирования задают критерии проведения эксперимента).

Поскольку ad-hoc сети в настоящее время находят широкое применения, а разработка алгоритмов маршрутизации является достаточно нетривиальной задачей, предлагаемые авторами программные средства и проводимые исследования являются актуальными.

Список литературы

1. **COMNET III**. Planning for Network Managers. Release 1.3. URL: <http://eent3.lsbu.ac.uk/staff/baoyb/acs/Comnet/comnet%20III.pdf> (Accessed: 10.06.2018).
2. **OMNeT++** Community Site. URL: <http://www.omnetpp.org> (Accessed: 10.06.18).
3. **OPNET**. URL: <http://www.riverbed.com/products/performance-management-control/opnet.html?redirect=opnet> (Accessed: 10.06.18) Zhang Y.
4. **ANYLOGIC**. URL: www.anylogic.ru. (Accessed: 10.06.18).
5. **Mikov A., Zamiatina E.** Program Tools and Language for Networks Simulation and Analysis // Proceedings SDN & NFV — The Next Generation of Computational Infrastructure: 2014 International Science and Technology Conference "Modern Networking Technologies (MoNeTec)". October 27—29. 2014. P. 94—102.
6. **Zamyatina E., Mikov A., Mikheev R.** Linguistic and Program Tools For Debugging and Testing Of Simulation Models Of Computer Networks // International Journal "Information Models and Analyses". 2013. Vol. 2, N. 1. P. 70—80.

7. **Mikov A. I.** Simulation and Design of Hardware and Software with Triad // Proc. 2nd Intl. Conf. on Electronic Hardware Description Languages. Las Vegas, USA. 1995. P. 15–20.
8. **Миков А. И.** Автоматизация синтеза микропроцессорных управляющих систем. Иркутск: Издательство Иркут. ун-та, 1987.
9. **Проскочило А. В., Воробьев А. В., Зряхов М. С., Кравчук А. С.** Анализ состояния и перспективы развития самоорганизующихся сетей // Научные ведомости. Сер. "Экономика. Информатика". 2015, № 19(216). Вып. 36/1. С. 177–187.
10. **Белфер Р. А.** Сети SON. Материал из Национальной библиотеки им. Баумана, 2012. URL: https://ru.bmstu.wiki/Seti_SON. (Accessed: 10.06.18).
11. **Oubbatia O. S., Lakasb A., Zhouc F., Güne M., Yagoubia M. B.** A survey on position-based routing protocols for Flying Ad-hoc Networks (FANETs) // Vehicular Communications. 2017. V. 10. P. 29–56.
12. **Qiu T., Chen N., Li K., Qiao D., Fu Z.** Heterogeneous ad hoc networks: Architectures, advances and challenges // Elsevier Ad Hoc Networks. 2017. Vol. 55. P. 143–152.
13. **Kucheryavy A.** State of the Art and Research Challenges for USN Traffic Flow Models // 16th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). 2014. P. 336–340.
14. **Чинь Б. Х., Парамонов А. И.** Исследование параметров маршрутов в самоорганизующихся сетях связи // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. С. 81–88.
15. **Li M., Salmanian M., Willink T. J.** Network layer connectivity awareness with application to investigate the OLSR protocol in tactical MANETs // Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference. P. 4093–4105.
16. **Liu X., Li Z., Yang P., Dong Y.** Information-centric mobile ad hoc networks and content routing: A survey // Ad Hoc Networks. 2017. Vol. 58. P. 255–268.
17. **Ali H. A., Areed M. F., Elewely D.** An on-demand power and load-aware multi-path node-disjoint source routing scheme implementation using NS-2 for mobile ad-hoc networks // Simulation Modelling Practice and Theory. 2018. Vol. 80. P. 50–65.
18. **Boussoufa-Lahlaha S., Semchedinea F., Bouallouche-Medjkoune L.** Geographic routing protocols for Vehicular Ad hoc Networks (VANETs): A survey // Vehicular Communications. 2018. Vol. 11. P. 20–31.
19. **Kitsisa R., Dattaa S.** Layer 3 Enhancements for Vehicular Ad Hoc Networks // Proceedings of the 9th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2018). Elsevier. Procedia Computer Science. 2018. Vol. 130. P. 628–635.
20. **Dharani Kumari N. V., Shylaja B. S.** AMGRP: AHP-based Multimetric Geographical Routing Protocol for Urban environment of VANETs // Journal of King Saud University — Computer and Information Sciences. 2017. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksuci.2017.01.001>.
21. **Григорьев А. А.** Алгоритмы маршрутизации в оппортунистических сетях // Труды МФТИ. 2013. Т. 5, № 3. С. 112–120.
22. **Mikov A. I.** Formal Method for Design of Dynamic Objects and Its Implementation in CAD Systems // Advances in Formal Design Methods for CAD, Preprints of the IFIP WG 5.2 Workshop on Formal Design Methods for Computer-Aided Design. Mexico. 1995. P. 105–127.
23. **Винокуров В. М., Пуговкин А. В., Пшенников А. А., Ушарова Д. Н., Филатов А. С.** Маршрутизация в беспроводных сетях // Труды ТУСУР. № 2(22). 2010. С. 288–292.
24. **Леонов А. В., Чаплышкин В. А.** Сети FANET // Омский научный вестник. 2015. № 3 (143). С. 297–301.
25. **Павлов А. А., Датъев И. О., Шишаев М. Г.** Разработка имитационных моделей для тестирования протоколов маршрутизации беспроводных многошаговых сетей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 7. С. 90–101. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-7-90-101.
26. **Щерба Е. В., Никонов В. И., Литвинов Г. А.** Обеспечение безопасности протоколов маршрутизации // Доклады ТУСУР. 2018. Т. 21, № 3. С. 19–70.
27. **Миков А. И.** Связность автономных беспроводных компьютерных сетей в местностях с плохой инфраструктурой // Экологический вестник научных центров. 2015. С. 70–75.
28. **Миков А. И.** Динамические геометрические графы мобильных ad hoc сетей // Информатизация и связь. 2017. № 2. С. 66–70.
29. **Vahdat A., Becker D.** Epidemic routing for partially connected ad hoc networks: Tech. Rep. CS-2000-06. Department of Computer Science, Duke University. Durham, NC, 2000.
30. **Musolesi M., Hailes S., Mascolo C.** Adaptive Routing in Intermittently Connected Mobile Ad Hoc Networks // Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM 2005). Naxos, 2005. P. 183–189.
31. **Leguay J., Friedman T., Conan V.** Evaluating Mobility Pattern Space Routing for DTNs // Proceedings of the IEEE Infocom 2006. Barcelona, 2006. P. 1–10.
32. **Widmer J., Le Boudec J.-Y.** Network Coding for Efficient Communication in Extreme Networks // Proceedings of ACM SIGCOMM 2005 Workshop on delay tolerant networks. Philadelphia, 2005. P. 284–291.

A. I. Mikov, Full Professor, Professor, e-mail: Alexander_Mikov@mail.ru,

Computer Technologies Department, Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation,

E. B. Zamyatina, Ph.D., Associate Professor, e-mail: ezamyatina@hse.ru,

Business Informatics Department, National Research University Higher School of Economics, Perm, Russian Federation,

S. M. Kalashnikov, Graduate Student, e-mail: ser.00@list.ru,

Computer Science Department, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

Research of Routing Algorithms in SON Networks Using Simulation Predictive Modeling Software

The paper presents the results of a study of one of the routing algorithms in ad-hoc networks, namely, in SON (self-organizing) networks, by the method of simulation. Some kinds of ad hoc networks and features of the implementation of routing algorithms in these networks are considered. Attention is focused on simulation modeling tools, the requirements for software of this kind are indicated, and the constructions of the simulation language Triad are given. The simulation is performed in the TriadNS tool environment developed by the authors.

Keywords: ad hoc networks, simulation modeling, simulation systems, dynamic graphs, routing algorithms

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 18-01-00359.

DOI: 10.17587/it.26.302-310

References

1. **COMNET III.** Planning for Network Managers. Release 1.3, available at: <http://eent3.lsbu.ac.uk/staff/baoyb/acs/Comnet/comnet%20III.pdf> (date of access: 10.02.2020).
2. **OMNeT++** Community Site, available at: <http://www.omnetpp.org> (date of access: 10.02.20).
3. **OPNET**, available at: <http://www.riverbed.com/products/performance-management-control/opnet.html?redirect=opnet> (date of access: 10.06.18).
4. **ANYLOGIC**, available at: www.anylogic.ru (date of access: 10.06.18).
5. **Mikov A., Zamiatina E.** Program Tools and Language for Networks Simulation and Analysis, *Proceedings SDN & NFV — The Next Generation of Computational Infrastructure: 2014 International Science and Technology Conference "Modern Networking Technologies (MoNeTec)"*, October 27—29, 2014, Lomonosov Moscow State University, pp. 94—102.
6. **Zamyatina E., Mikov A., Mikheev R.** Linguistic and Program Tools For Debugging and Testing Of Simulation Models Of Computer Networks, *International Journal "Information Models and Analyses"*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 70—80.
7. **Mikov A. I.** Simulation and Design of Hardware and Software with Triad, *Proc. 2nd Intl. Conf. on Electronic Hardware Description Languages*, Las Vegas, USA, 1995, pp. 15—20.
8. **Mikov A. I.** Avtomatizatsiya sinteza mikroprocessornykh upravlyashih system, Irkutsk, Publishing house of Irkut. un-t, 1987 (in Russian).
9. **Proskochylo A. V., Vorobyov A. V., Zriakhov M. S., Kravchuk A. S.** Analysis of state and development perspectives of self-organizing networks, *Nauchnye vedomosti, Seriya Ekonomika. Informatika*, 2015, no. 19 (216), iss. 36/1, pp. 177—187 (in Russian).
10. **Belfer R. A.** Seti SON, Material is Nacionalnoy biblioteki im. N. E. Bauman, 2012, available at: https://ru.bmstu.wiki/Seti_SON (date of access: 10.06.18) (in Russian).
11. **Oubbatiya O. S., Lakas A., Zhouc F., Güne M., Yagoubia M. B.** A survey on position-based routing protocols for Flying Adhoc Networks (FANETs), *Vehicular Communications*, 2017, vol. 10, pp. 29—56.
12. **Qiu T., Chen N., Li K., Qiao D., Fu Z.** Heterogeneous ad hoc networks: Architectures, advances and challenges, *Elsevier Ad Hoc Networks*, 2017, vol. 55, pp. 143—152.
13. **Koucheryayvi A.** State of the Art and Research Challenges for USN Traffic Flow Models, *16th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2014, pp. 336—340.
14. **Trinh B., Paramonov A.** Research of parameters of routes in self-organizing networks, *Information technologies and telecommunications*, 2016, vol. 4, no. 4, pp. 81—88 (in Russian).
15. **Li M., Salmanian M., Willink T. J.** Network layer connectivity awareness with application to investigate the OLSR protocol in tactical MANETs, *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference*, pp. 4093—4105.
16. **Liu X., Li Z., Yang P., Dong Y.** Information-centric mobile ad hoc networks and content routing: A survey, *Ad Hoc Networks*, 2017, vol. 58, pp. 255—268.
17. **Ali H. A., Areed M. F., Elewely D.** An on-demand power and load-aware multi-path node-disjoint source routing scheme implementation using NS-2 for mobile ad-hoc networks, *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 80, 2018, pp. 50—65.
18. **Boussoufa-Lahlaha S., Semchedinea F., Bouallouche-Medjkouna L.** Geographic routing protocols for Vehicular Ad hoc NETWORKS (VANETs): A survey, *Vehicular Communications*, 2018, vol. 11, pp. 20—31.
19. **Kitsisa R., Dattaa S.** Layer 3 Enhancements for Vehicular Ad Hoc Networks, *Proceedings of the 9th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2018), Procedia Computer Science*, 2018, vol. 130, pp. 628—635.
20. **Dharani Kumari N. V., Shylaja B. S.** AMGRP: AHP-based Multimetric Geographical Routing Protocol for Urban environment of VANETs, *Journal of King Saud University — Computer and Information Sciences*, 2017, available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksuci.2017.01.001>.
21. **Grigoriev A. A.** *Trudy MFTI*, 2013, vol. 5, no. 3, pp. 112—120 (in Russian).
22. **Mikov A. I.** Formal Method for Design of Dynamic Objects and Its Implementation in CAD Systems // *Advances in Formal Design Methods for CAD*, Preprints of the IFIP WG 5.2 Workshop on Formal Design Methods for Computer-Aided Design. Mexico. 1995. P. 105—127.
23. **Vinokurov V. M., Pugovkin A. V., Pshennikov A. A., Usharova D. N., Filatov A. S.** *Trudy TUSUR*, 2010, no. 2 (22), pp. 288—292 (in Russian).
24. **Leonov A. V., Chaplyshkin V. A.** *Omskiyi nauchnyi vestnik*, 2015, no. 3 (143), pp. 297—301 (in Russian).
25. **Pavlov A. A., Datiev I. O., Shishaev M. G.** *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, no. 7, pp. 90—101, DOI: 10.21.285/1814-3520-2016-7-90-101 (in Russian).
26. **Sherba E. V., Nikonov V. I., Litvinov G. A.** *Doclady TUSUR*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 19—70 (in Russian).
27. **Mikov A. I.** *Ekologicheskii vestnik nauchnykh centrov CHES*, 2015, pp. 70—75 (in Russian).
28. **Mikov A. I.** *Informatizatsia i Svyaz*, 2017, no. 2, pp. 66—70 (in Russian).
29. **Vahdat A., Becker D.** Epidemic routing for partially connected ad hoc networks: Tech. Rep. CS-2000-06, Department of Computer Science, Duke University, Durham, NC, 2000.
30. **Musolesi M., Hailes S., Mascolo C.** Adaptive Routing in Intermittently Connected Mobile Ad Hoc Networks, *Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM 2005)*, Naxos, 2005, pp. 283—289.
31. **Leguay J., Friedman T., Conan V.** Evaluating Mobility Pattern Space Routing for DTNs, *Proceedings of the IEEE Infocom 2006*, Barcelona, 2006, pp. 1—10.
32. **Widmer J., Boudec J.-Y. L.** Network Coding for Efficient Communication in Extreme Networks, *Proceedings of ACM SIGCOMM 2005 Workshop on delay tolerant networks*, Philadelphia, 2005, pp. 284—291.

Г. В. Курцева, пенсионер, e-mail: gibiscus.geranium@yandex.ru

Некоторые замечания к понятиям энтропия и информация

Обосновывается определение энтропии как интенсивности вероятностного процесса. Вводится понятие абстрактного процесса, на основании которого информация определяется как внутреннее отношение систем с обратной связью. Предлагается новый подход к определению количества информации для детерминированных систем.

Ключевые слова: энтропия, информации, абстрактный процесс, количество информации

Введение

Часто используемое понятие информации до настоящего времени не получило точного и ясного определения. Невозможно принять за определение то, что дается в словарях и учебниках информатики (информация — некоторые сведения, знания), поскольку такое определение тавтологично и не раскрывает сути понятия. (Сложности определения понятия информации описаны в работе Чернавского Д. С. [1].)

1. Методы определения количества информации

В комбинаторном подходе для определения количества информации в качестве меры берется логарифм от числа N всевозможных размещений условных "0" и "1" в ячейках памяти $\log_2 N$, что показывает число ячеек памяти, в которых происходит размещение. Имеется уже закодированная в двоичной системе информация и рассматривается ее запись с учетом равной вероятности появления "0" и "1". Неявно используется вероятностный взгляд на характер символов, несущих информацию, но вполне прагматично-детерминистский подход для учета числа ячеек с помощью меры битов. При этом, как и в остальных случаях, полностью абстрагируются от смысла или, другими словами, от содержания информации.

Второй подход определения количества информации (по Шеннону) основан на учете вероятностного появления в слове или в сообще-

щении конкретной буквы из некоторого алфавита. Логарифм $p(x)\log_2(x)$ позволяет получать число появлений конкретного символа, буквы с учетом совместного распределения вероятностей для всех символов, букв или рассчитать среднее число таких появлений [2].

Синтаксический подход к определению количества информации восходит к идеям К. Шеннона. Однако сам К. Шеннон предупреждал об ошибочности термодинамической трактовки информации и был против распространения его подхода на другие научные направления: он писал о специфике задач связи, о трудностях и ограничениях своей теории.

Третий, колмогоровский подход, использует понятие алгоритма [3], мерой служит длина алгоритма.

Все перечисленные подходы тем или иным способом дают возможность оценить количество разнообразия в форме ли числа состояний системы, шагов алгоритма, связывающего состояния или наборов переменных, отражающих некоторые состояния системы. Под понятием "количество информации" во всех случаях подразумевается количество разнообразия. Этот факт отмечен Эшби [4].

2. Причины выбора логарифмической функции в формулах расчета количества информации или энтропии

В физике логарифм от величины вероятности $\sum p_i(t, p, q) \ln p_i(t, p, q)$ дает среднее количество состояний термодинамической системы. Вы-

бор основания обусловлен экспоненциальным законом распределения, как и выбор самой функции $\ln$ закономерен и продиктован отнюдь не удобствами оперирования с числами, но аддитивностью числа состояний системы и зависимостью от числа частиц, участвующих в процессе соударений, или иных взаимодействий со случайным приращением.

Энтропия, с которой имеет дело статистическая физика и термодинамика, представляющая среднюю величину числа состояний, определяет интенсивность стохастического процесса. Точность значения информации о таких величинах сама по себе достаточно спорна. Под информацией при этом подразумеваются наши знания. Так, мера неопределенности наших знаний, оказывается, определяет вполне определенное распределение микросистем по энергиям! Изменяются ли наши знания на значение логарифма термодинамической вероятности?

Выбор функции логарифма в формулах вероятностно-статистического подхода, очевидно, обусловлен тем фактом, что выбор из любого множества событий можно последовательно свести к выбору всякий раз между двумя множествами. Количество разнообразия сводится к числу ячеек, заполненных нулями и единицами, что соответствует кодированию элементов множества с помощью двоичного кода.

В том случае, когда определяется количество разнообразия для некоторого множества элементов M , формула $\log_2 N = M$ свидетельствует, что результаты опыта дают все многообразие подмножеств множества M , равное 2^M .

3. Противоречия абсолютизации вероятностно-статистических методов и абстрагирования от содержания понятий

Н. Винер исходил из идеи измерения "дезорганизованности" системы с помощью энтропии [5]. При этом, с одной стороны, "дезорганизованность" может выражаться различными, но вполне определенными законами распределения случайных величин, с другой стороны, организованность, если взять определенную систему, не имеет мысленного ограничения. Сама по себе организованность, или упорядоченность, не может измеряться величиной, характеризующей неопределенность.

Винер предложил определять количество информации, полученное при измерении некоторой случайной величины следующим об-

разом: "...мы знаем априори, что некоторая переменная лежит между нулем и единицей, и знаем апостериори, что она лежит в интервале (a, b) внутри интервала $(0, 1)$. Тогда количество информации, получаемой нами из апостериорного знания, равно

$$-\log_2 \frac{\text{мера интервала } (a, b)}{\text{мера интервала } (0, 1)}$$

..."

Мы проводим измерение. Ясно, что пределы измерения величины могут быть любыми. Поэтому было бы бессмысленно выбирать вероятность появления некоторого числа, пусть даже принимаемого с определенной погрешностью, как основу для определения информации. Винару приходится вводить искусственные границы, в которых может лежать измеряемая величина. Вводить границы можно произвольно, это субъективный выбор, отсюда следует произвольный результат. Такой подход есть следствие абсолютизации вероятностной стороны явлений.

Следует еще заметить, что знание вероятностей появления событий априори обнуляет количество вновь приобретенных знаний апостериори. Какое бы событие ни произошло, мы уже заранее знаем количество информации, которое оно с собой несет.

А. Н. Колмогоров, хотя и в рамках математической теории, сумел подойти к пониманию того, что источником появления или изменения информации является процесс, а возможность однообразного отображения в компьютере различных процессов позволяет говорить об абстрактном процессе — субстанции информации. Понятие абстрактного процесса вводится в работе [6]. Недостатком по-прежнему остается отказ от смыслов информации. Измеряется зависящая от способа программирования и языка программирования длина алгоритма, выражаемая с помощью современных методов приближенно через функцию сложности.

Объекты, которые рассматривает А. Н. Колмогоров, — натуральные числа или какие-то конструктивные объекты, по сути, вычислимые числа, абстрактные бессодержательные понятия. Поэтому все изучаемое разнообразие ограничивается возможностями шагов программы, переводящей элемент "условие задачи" в элемент "ответ".

В отношении таких объектов можно поставить вопрос: сколько информации содержит объект x относительно объекта y ? Для содержательных понятий такой вопрос во мно-

гих случаях был бы некорректным. Сколько информации содержит факт произрастания в огороде бузины по отношению к факту проживания в Киеве дядьки?

Самому А. Н. Колмогорову приходится вводить разграничение между сложностью, отождествляемой им с минимальной длиной алгоритма, и необходимой сложностью вычисления как длительностью компьютерной переработки программы. Хотя во многих работах колмогоровская сложность трактуется как простая колмогоровская энтропия [7].

(Различие между абстрактной сложностью и технологической выявляется в работах Шарина Ю. С., Якимовича Б. А., Толмачева В. Г., Коршунова А. И. [8, 9].)

В определенную программу, алгоритм можно вводить различные данные, решая однотипные задачи. Инвариантом выступает последовательность обработки данных, которую можно связать с количеством информации. Длина каждого алгоритма характеризует структуру самого алгоритма и возможность отображения сложных иерархических структур алгоритмов в последовательности шагов, что представляет собой количественную информационную оценку алгоритма. Вместе с тем решение задачи с определенными условиями можно получить с помощью различных алгоритмов разной длины, сохраняющими содержание объектов "вход", "выход". Структура объектов "условие задачи" и "ответ" тогда выступают инвариантами по отношению к множеству обрабатываемых их алгоритмов.

Если поставить вопрос: сколько информации содержится в заранее имеющихся данных об объекте x относительно объекта y , имея в виду, что оба принадлежат множеству абстрактных математических объектов, то поиск минимального алгоритма для чисел, введенных или отображенных в компьютере, т. е. вычислимых, превращается в тривиальную банальную задачу, а учитывая эквивалентность вычислительных моделей, также выглядят и прочие вычислимые задачи. Очевидно, объект y является заранее не известным и формируется ходом программы. А нахождение минимального алгоритма относится в общем случае к неразрешимым задачам.

Неясной остается правомерность отождествления понятий сложности и информации и их меры или понятий энтропии и информации в тех случаях, когда говорят о количестве информации, полученной за счет уменьшения энтропии на ту же величину.

Между тем уже Эшби указывал на условия применимости вероятностного подхода:

"1. Различные дроби, изображающие множество вероятностей, должны в сумме давать 1; энтропия не может быть вычислена для неполного множества возможностей.

2. Матрица переходных вероятностей, изображающая источник информации с несколькими множествами вероятностей, должна быть марковской; это означает, что вероятность каждого перехода должна зависеть только от состояния, в котором находится система, а не от состояний, в которых она находилась раньше..."

3. Передавая своими словами: система должна находиться в равновесии, что позволяет рассчитывать частоты появления событий, ассоциированные с вероятностями.

В переводе на русский язык все это означает, что о количестве информации можно говорить только применительно к событиям, частоту повторений которых можно гарантированно рассчитать, система, порождающая события, должна находиться в равновесии. Единичные события информации не несут.

Очевидно, что то, что подавляющее число событий и явлений окружающего мира не удовлетворяют перечисленным условиям, исследователей не смущает.

4. Попытка Виго решить вопрос об определении количества так называемой репрезентативной информации

Цель Виго — преодоление ограничений теории Шеннона—Уивера при измерении и характеристике субъективной информации и "предоставление альтернативного математического объяснения природы информации", что до некоторой степени выражает неудовлетворенность части физиологов вероятностными методами [10, 11].

Виго, в отличие от Колмогорова, при попытке найти количественную меру знаний исходит из объема понятия. Не определяя содержания предлагаемого понятия, не определяя значения самого понятия "информация", он, тем не менее, предлагает способ оценки успешности процесса обучения понятиям, используя так называемый репрезентативный подход, основанный на "теории категориальной инвариантности", одновременно развивая подход обобщенной контекстной модели вслед за Р. М. Нософским, Мединым, Палмери, Шаффером [12].

Иллюстрирующий возможности метода пример множества категорий (или объектов) — набор из разного размера и цвета шаров, треугольников и квадратов, который явно представляет множество геометрических фигур и, по логике, должен иллюстрировать понятие "геометрические фигуры", оценивается Виго с точки зрения однородности по отношению не к существенным признакам, а к второстепенным: цвет, форма, размер.

Каждому признаку из ограниченного множества присваивается значение единицы. Выстраивается булева функция на основе наличия (1) или отсутствия (0) признака у объекта из некоторого множества объектов. Выстраивается функция, позволяющая определить число объектов, сохранивших принадлежность исходному множеству объектов

$$\Phi(F(x_1, \dots, x_D)) = \left[\sum_{i=1}^D \left\| \frac{\partial F(x_1, \dots, x_D)}{\partial x_i} \right\|^2 \right]^{1/2},$$

x_i — признаки; F — булева функция; D — объем множества признаков, используется дискретная частная производная

$$\left\| \frac{\partial F(x_1, \dots, x_D)}{\partial x_i} \right\| = 1 - \left[\frac{1}{p} \sum_{x_j \in F} \left| \frac{\partial F(x_j)}{\partial x_j} \right| \right],$$

где $p = |F(x_1, \dots, x_D)|$.

Субъективная структурная сложность понятия категории

$$\Psi(F) = \frac{p}{f(\Phi(F))}.$$

Функция f определяется из физиологических соображений. Подмножество множества объектов информативно в отношении понятия постольку, поскольку удаление отдельного элемента из множества, характеризующего понятие, уменьшает или увеличивает субъективную сложность понятия (или категории). Репрезентативная информация

$$h(R|F) = (\Psi(G) - \Psi(F))/\Psi(F),$$

где R — подмножество множества объектов F , $G = F - R$.

Таким образом, репрезентативная информация Виго, оказывается, в большей степени зависит от вида функции f , которая согласно контекстной модели является экспонентой, и от объема рассматриваемого множества объектов, которое в рассматриваемых примерах выбирается произвольно.

5. Сложности, возникающие при определении количества информации в биологических системах

Неприемлемость вероятностно-статистического подхода в случае биологических систем отмечена в работе Л. А. Блюменфельда [13]: "Согласно физическим критериям любая биологическая система упорядочена не больше, чем кусок породы того же веса".

В качестве примера того, насколько проблема определения информации и, тем более, определения ее количества остаются не разработанной, можно привести пример из биологии. Известен С-парадокс — отсутствие корреляции между физическими размерами генома и сложностью организмов. Самым большим оказывается геном растения *Paris japonica*, а самым сложным — организм человека. Количество генетической информации, с которой ассоциируется сложность организмов, стремятся вычислять исходя то ли из числа генов, то ли из числа нуклеотидов, т.е., отталкиваясь от длины ДНК. При этом исследователей не смущает тот факт, что код сам по себе и содержание — не тождественны. Такой подход имеет своим началом работы Шеннона, в которых единица информации ассоциировалась с буквой алфавита, но не с содержанием сообщения. Буква — ген или слово — нуклеотид не кодируют сами по себе сообщения. Сообщение или его аналог — предложение, кодируется набором слов, причем один и тот же смысл — содержание сообщения — может быть кодирован различными способами. Поэтому определять количество биологической информации исходя из длины ДНК — числа генов — представляется неразумным.

Если обратиться к проблеме информации как синонима наших знаний, то сразу же возникает психофизиологический парадокс. "Парадокс качественной разнородности психических явлений (образов) и качественной однородности вызывающих эти явления нервных процессов является одним из важнейших вопросов психофизиологии" [14]. Другой стороной парадокса является разнородность воздействующих внешних раздражителей и качественная однородность вызываемых этими явлениями нервных процессов, в частности, — мульти-сенсорная конвергенция, или в более общем виде: разнородность материальных явлений и однородность информационных процессов в отображающих системах. Такого рода разнородность позволяет поставить вопрос, что есть общего в разнородных явлениях, представля-

ющих входные сигналы для воспринимающей системы? Что является инвариантом при передаче информации через различные каналы связи и по-разному закодированной?

6. Субстанция информации

Качественное единство временных и пространственных информационных структур, процессов передачи информации и материальных информационных структур, изоморфизм, возможность перевода данной структуры на любую физическую основу, смена форм информации позволяют поставить вопрос о том, что есть общего в информационных явлениях, позволяющих информации циркулировать и обращаться. Все они, очевидно, являются продуктом некоторого процесса, причем процесса абстрактного, не зависящего от физической природы явлений, основным содержанием которого является создание определенной последовательности или очередности материальных изменений. Субстанцией информации является абстрактный процесс. Инвариантность информации относительно перевода ее на различные физические носители или преобразования материи говорит об однородности материи по отношению к переносу информации на качественно различные уровни ее организации и о пространственной ее изотропности.

Проявление качественного тождества информационных процессов выражает всеобщую связь всех материальных предметов, материальное единство, а также всеобщность формы процессов для всего материального мира.

Разнообразие порождается абстрактным процессом.

7. Российские физиологи о детерминизме информационных явлений

А. Г. Маклаков, разбирая особенности психических явлений и процессов, отмечал необходимость пространственно-временной организации сигнала, что является линейным инвариантом многомерного физического мира [15]. Универсальной формой отображения, заметим от себя. Такой вывод он основывает на высказанных Н.Винером положениях о пространственно-временных характеристиках сигнала.

Предпосылкой появления всеобщей физиологической функции и связи в организме, реализуемой нервной системой, является отношение пропорциональности и взаимосвязанности

всех физиологических процессов. Постоянные соотношения между различными величинами, определяющими взаимосвязанные циклы, позволяют отражать один процесс — в другом, третьем. Нервный импульс становится эквивалентом физиологического процесса.

Однако для того чтобы разнородные физические раздражители получали единообразное отображение и представление, необходимо, чтобы внешний физический сигнал вместе с нервным импульсом входил в единый цикл, петлю, образовывал рефлекторное кольцо. Причем изменение одного отображаемого раздражителя должно быть приравнено к изменению другого. Скажем, измерение расстояния с помощью изменения угла, под которым зрение воспринимает предмет, должно в пропорциональной форме соответствовать тактильному ощущению. Появление предмета в зрительной области восприятия должно быть подтверждено в звуковой сфере. Ясно, что такого рода отображения должны постоянно подтверждаться с помощью петель обратной связи и поддерживать пропорциональность между ними. Основная функция психики по Н. Н. Ланге — "круговая реакция", включающая центростремительный ток, сообщающий организму о достигнутом, и центробежная реакция как ответ (из того же учебника А. Г. Маклакова). Информация в форме нервных импульсов представляет всеобщее организменное отношение эквивалентности (и регуляции). Причем следует говорить не только об информационной эквивалентности множества внешних воздействий и их внутренних психических отражений, что утверждает Маклаков, но также и об информационной эквивалентности внутренних психических процессов. На уровне биомолекулярной динамики пропорциональность и связанность выражается в распознавании и взаимном узнавании макромолекул ДНК, РНК и белков.

Хотелось бы отметить неправомочность представления об информации только как о совокупности знаний и с точки зрения психологии, где знаниями обозначается множество понятий и образов, чаще в речевой форме, в отличие от условных рефлексов — отмеченное физиологами свойство реагирования на раздражитель без использования знаний. По И. П. Павлову речемыслительные процессы относятся к другой, ко второй сигнальной системе. Тем самым разграничиваются качественно разные виды информации.

Информационная связь в организме должна иметь детерминированный характер. На этом

настаивал П. К. Анохин и развил идею в теории акцептора действия [16, 17]. Реализация определенного состояния мозга как реакции на возбуждение — не случайный процесс, но целенаправленный. А. К. Анохин подверг критике теорию "вероятностного прогнозирования" Файгенберга и выдвинул свою модель поведения — теорию функциональных систем. Уже учение И. П. Павлова утверждает принцип детерминизма. Какой бы статистической сложностью не обладал раздражитель, он воспринимается организмом как единичный сигнал.

8. Сигнал — единица информации

Эквивалентность качественно различных изменений, назовем их сигналами, возможна в том случае, когда система обеспечивает постоянную пропорциональность между ними, а это возможно в том случае, когда весь процесс зациклен. Свойство пропорциональности должно быть свойством всей системы взаимосвязанных циклов. Единичный сигнал одного уровня (химическое вещество в химической реакции, сборочная единица или автомат в системе автоматизированного производства) на другом уровне выступает как составная структурная часть другого единичного сигнала (белка, механизма, автоматизированного завода), входящего в цикл более высокого уровня и сопряженного с другими циклами. В этом смысле величина информации подобна величине энергии в физике, имеет смысл только относительное ее количество. Вместе с тем рассуждать о количестве информации одного объекта в сравнении с другим можно только в случае принадлежности обоих к одному связывающему их циклу относительно цикла, что выражает тот факт, что информация представляет собой системное отношение.

Изменение любого параметра должно привести к изменению сопряженных с ним величин по цепочке цикла, что создает предпосылку для образования регулирующих обратных связей. Контур обратной связи реализует отношение причинно-следственных связей, внешнего воздействия на внутреннее и обратно. Это является первым требованием к тому, чтобы внешнее воздействие на систему приобрело информационный характер. Вторым требованием является открытость системы. Третье требование — наличие движения, процесса, что связано со вторым, необходимость поддержания движения требует притока энергии и вещества. Если

подходить к множеству физических процессов отражения, которые существуют благодаря постоянству физических закономерностей, с требованием наличия контура обратной связи, то придется также усомниться в возможности появления или изменения информации по отношению к той или иной физической системе, а не к нашим знаниям, существующим благодаря физиологическим психофизическим замкнутым контурам.

Можно заметить, что положение о тождестве вычислимых и рекурсивных функций и убежденность в тождестве понятий "вычислимость", "машина Тьюринга" и "алгоритм" не противоречат требованиям, накладываемым на информационные системы для обеспечения эквивалентности входного сигнала и его кодированного отражения.

Во-первых, движение сигнала по контуру, т. е. процесс в определенном направлении, уже обеспечивает упорядоченность. В определении рекурсивных функций это находит свое отражение в функции следования. Во-вторых, замкнутость контура, ей соответствует функция возврат нуля (или константы). В-третьих, реакция на сумму входных воздействий равна сумме внутренних реакций на эти воздействия, что определяет требование аддитивности. Далее, при изменении амплитуды входного сигнала в k раз во столько же должна изменяться амплитуда выходного сигнала, что обеспечивается линейностью процессов. В-четвертых, процесс должен быть однородным, чтобы сохранялась устойчивость формы сигнала при изменении амплитуды.

Все перечисленные требования определяют линейную систему, для которой отклик на сумму воздействий равен сумме откликов на каждое воздействие, она реализует принцип суперпозиции. Линейная система, кроме того, осуществляет принцип рекурсии: элементом действия может выступать как отдельный элемент, так и их комбинация или комбинация откликов как результат действия функций.

Обобщая, можно сказать, что взаимодействие сводимо к элементарным тривиальным изменениям, сводимым, в свою очередь, к пространственно-временным, линейным. Эти идеи восходят к представлениям об информации основоположника кибернетики Н. Винера. Уже в самом названии его труда связаны понятия управления, т. е. обратной связи, и связи в животном и машине.

Единичный сигнал может иметь любую форму, это может быть замыкание электри-

ческой цепи, падение груза, подъем воды до определенного уровня или свет свечи. Важно, что он вызывает единичный, определенный, соответствующий только данному виду воздействия отклик в системе, изменяющий состояние системы. (Сигналом может также быть временной промежуток.)

Это позволяет определить меру количества информации для детерминированных систем как число сигналов.

Изменение количества относительно. Оно, очевидно, зависит от способности системы реагировать на качественно различные виды воздействий, а также от пределов восприятия. Это объективная сторона. Но есть и субъективная.

На столе лежит яблоко. Сколько информации содержится в данном сообщении? Наличие яблока не зависит от вероятности нахождения других яблок на предполагаемых столах. Не зависит и от других опытов по определению, лежит ли некое яблоко на столе или нет. Это единичный сигнал, который мы и воспринимаем как единичный. Для установления данного факта необходимо, чтобы в нашем сознании было сформировано понятие "яблоко" и установлена связь зрительного образа с данным понятием. Если известно, что яблоко зрелое, то это подразумевает, что сформировано понятие "зрелое". Количество информации увеличивается на единицу. Таким образом, количество информации зависит не только от числа возможных свойств, связей и сложности внутренней структуры объекта, но и от числа внутренних состояний воспринимающей системы, которые могут изменяться под воздействием внешнего сигнала. Допустим, нужно выбрать червонного валета из колоды в 36 карт. Известная задача, нужно выполнить пять шагов для выбора: 1 — выбор цвета масти, 2 — выбор определенной масти, 2 — выбор разряда старших карт, 4 — выбор разряда не самых старших, 5 — выбор валета. Каждый шаг означает идентификацию по определенному признаку: цвет, масть, разряд по старшинству, различие среди разряда старших, выбор конкретной карты. Количество информации равно 5. Количество информации, таким образом, пропорционально объему сформированных понятий и образов. Можно утверждать, что количество информации, содержащееся в законе Ньютона, со временем растет, по мере увеличения сфер и случаев своего применения.

Рассмотрим технологический процесс. Он реализовывает определенную программу обработки и формирования сырья и материалов.

В этой программе — цикле производства — каждое составляющее в своей пропорциональности и определенном месте в процессе равно любой другой составляющей, независимо от количества, выраженного в тоннах, ваттах, метрах или часах плавки. Все они суть один процесс. Каждая стадия технологического процесса соответствует определенной операции, веществу, перемещению, и засчитывается как отдельный сигнал. Такие шаги суммируются и дают общее количество информации.

Подход, основанный на измерении числа шагов технологического процесса, а не стоимостных показателей отдельных его частей, что не относится к технологическим характеристикам, позволил бы измерять степень интегрированности различных производств, долю импортируемых комплектующих, наконец, степень развития промышленной системы. Такое развитие, как известно, определяется разделением труда, которое способно получить количественную оценку.

9. Отличие сложности от информации

Понятия информации и сложности связаны с проблемой вычислимости, и если в отношении понятия сложности мыслимых ограничений не существует, то в отношении вычислимости вопрос остается открытым. Отсутствует четко определенное понятие сложности [18]. Теория неравновесных состояний и теория динамических систем порождают новые направления исследования сложных процессов.

Существуют методы оценки конструктивно-технологической сложности изделий. Они основываются на возможности рекурсивной иерархической декомпозиции детали на отдельные элементы. Членение, с одной стороны, имеет под собой возможность абстрактного описания, с другой — выявляет материальные технологические особенности конкретного процесса создания детали или ее обработки. Ясно, что технологические особенности включают в себя множество показателей: удобство производства изделия, ремонтпригодность, место изготовления, серийность, культура производства, доступное оборудование, привлекаемый персонал, развитость межхозяйственных связей и тому подобное. Абстрактное описание детали может существовать в голове конструктора или в памяти ЭВМ. Такое абстрактное описание, модель, информация представляют составляющую понятия сложности, но не исчерпывают его.

Подобным образом можно было бы взглянуть на изображение лица человека. При всей сложности отображения, а затем идентификации узнанное лицо представляет собой единичный сигнал, что подтверждает отличие сложности от информации. Информация всегда подразумевает отношение объекта и его описания в рамках единого цикла.

Некоторые замечания к понятиям энтропия и информация

Some Remarks on the Notions of Entropy and Information

The entropy is defined as the intensity of the stochastic process. The concept of abstract process is introduced, on the basis of which information is defined as the inner relation of the systems with feedback. There is proposed a new approach to determining the amount of information of deterministic systems.

Keywords: entropy, information, abstract process, complexity, the amount of information

DOI: 10.17587/it.26.311-319

References

1. **Chernavskiy D. S.** Synergy and information: dynamic information theory, Moscow, Science, 2001. 288 p. (in Russian).
2. **Shannon C.** Work on the theory of information and cybernetics, Moscow, The foreign lit. publ. house, 1963, 832 p. (in Russian).
3. **Kolmogorov A. N.** Information theory and algorithm theory, Moscow, Science, 1987, 304 p. (in Russian).
4. **Ashby W. Ross.** An Introduction to Cybernetics, London, Chapman and Hall LTD, 1956, 430 p.
5. **Viner N.** Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine, N. Y. — London, The M. I.T. Press and John Wiley & Sons Inc., 1961, 340 p.
6. **Kurtseva G. V.** Theses on cybernetics and synergetics, *Interuniversity collection of scientific philosophy papers. New ideas in philosophy. The heuristic function of scientific.* Perm State Univ., 2002, no. 11, pp. 169—173 (in Russian).
7. **Shen' A. X.** Algorithmic theory of Information. Book review. Kolmogorov A. N. Information theory and algorithm theory, Moscow, Science, 1987. p. 257 (in Russian).
8. **Korshunov A. I.** Introduction to the theory of structural and technological complexity of engineering products, *Sovremennye Naukoemkie Tekhnologii*, 2004, no. 2, pp. 66—67 (in Russian).
9. **Sharin Yu. S., Yakimovich B. A., Tolmachev V. G., Korshunov A. I.** Complexity theory, Izhevsk, Izhevsk. Gos. Tech. Univ., 1999, 128 p. (in Russian).
10. **Vigo R.** Categorical invariance and structural complexity in human concept learning, *J. Math. Psychol.*, 2009, vol. 53, pp. 203—221.
11. **Vigo R.** Representational information: a new general notion and measure of information, *Informational Scienc*, 2011, vol. 181 (21), pp. 4847—4859.
12. **Gregory L. Murphy.** *The Big Book of Concepts*, Cambridge, MIT Press, MA, 2002, 555 p.
13. **Blymenfel'd L. D.** Thermodynamics, information and design of biological systems, *Sorovskiy Obrazovatel'nyy Zhurnal*, 1996, no. 7, pp. 88—92 (in Russian).
14. **Opanasyuk Z. V.** Psychophysiological paradox and the problem of development, *Interuniversity collection of scientific philosophy papers. New ideas in philosophy. The heuristic function of scientific.* Perm State Univ., 2002, no. 11, pp. 118—123 (in Russian).
15. **Maklakov A. G.** *General psychology*, St. Petersburg, Piter, 2001, 592 p. (in Russian).
16. **Anoxin P. K.** *Essays in the physiology of functional systems: selected works*, Moscow, Nauka, 1975, pp. 17—62 (in Russian).
17. **Anoxin P. K.** *Philosophical aspects of the theory of functional systems*, Moscow, Nauka, 1978. 399 p. (in Russian).
18. **Miloslavov A. S.** What is the complexity? *Nauchn.-texn. Vestn. SPbGU ITMO*, 2007, no. 36, pp. 27—35 (in Russian).
19. **Buslenko N. P., Kalashnikov N. N., Kovalenko I. N.** *Lectures on the theory of complex systems*, Moscow, Sovetskoe radio, 1973, 441 p. (in Russian).

20—22 октября 2020 года в Москве

состоится

Третья Международная научно-техническая конференция

«СОВРЕМЕННЫЕ СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» (MoNeTec—2020)

Председатель программного комитета:

Р. Л. Смелянский, чл.-корр. РАН, профессор, МГУ им. М.В. Ломоносов

Конференция собирает представителей международного научного сообщества, исследовательских подразделений корпораций, стартапов, промышленности и бизнеса, институтов развития и органов государственной власти для обсуждения перспективных и актуальных технологий в сфере компьютерных сетей, виртуализации сетевых ресурсов и облачных вычислений, использования методов искусственного интеллекта.

Основные темы конференции

- Архитектура и протоколы для автоматизации управления сетями и оркестрации в облачных инфраструктурах.
- Инновационные технологии для облаков, интернета, компьютерных сетей.
- Новые парадигмы в организации и функционирования сетей, например, Intent Based Network, Information Centric Network, Content Centric Network т.п.
- Подходы, методы и средства для управления качеством сервиса и распределения ресурсов в сетях и облачных средах.
- Применение больших данных и машинного обучения для повышения эффективности функционирования сетей, облачных платформ и управления ими.
- Проблемы безопасности сетей и облачных платформ.
- Применение сетевых облачных технологий к обработке больших данных, Интернета вещей, сетей беспроводной и мобильной связи.
- Вопросы архитектуры программно-управляемого телекоммуникационного оборудования.

Организаторы конференции: Центр прикладных исследований компьютерных сетей (ЦПИКС), Международный центр по информатике и электронике (ИнтерЭВМ), факультет ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова, Технический Университет связи и информатики (МТУСИ), Консорциум «Сетевые и облачные технологии».

Подробная информация о конференции, размещена на официальном сайте
<http://www.monetec.ru>

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *М. Ю. Безменова*.

Сдано в набор 10.03.2020. Подписано в печать 24.04.2020. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ IT520. Цена договорная.

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

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

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

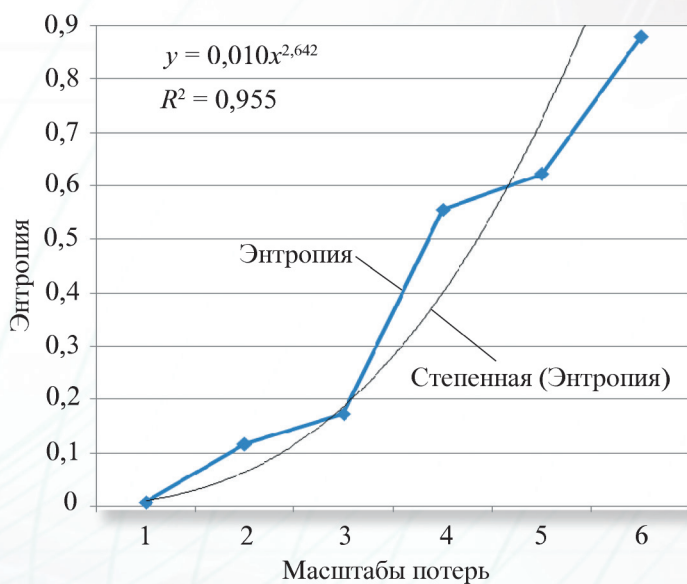


Рис. 1. График энтропии опасности от масштаба потерь

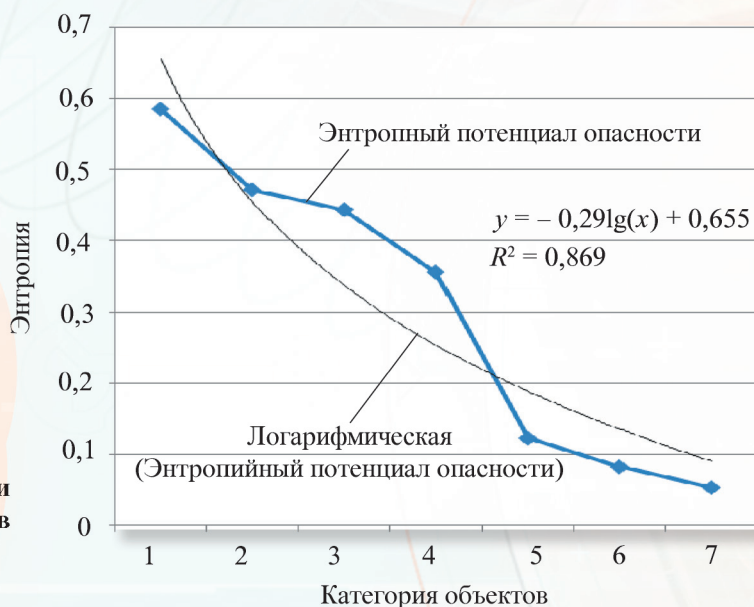


Рис. 2. Энтропия опасности категорируемых объектов

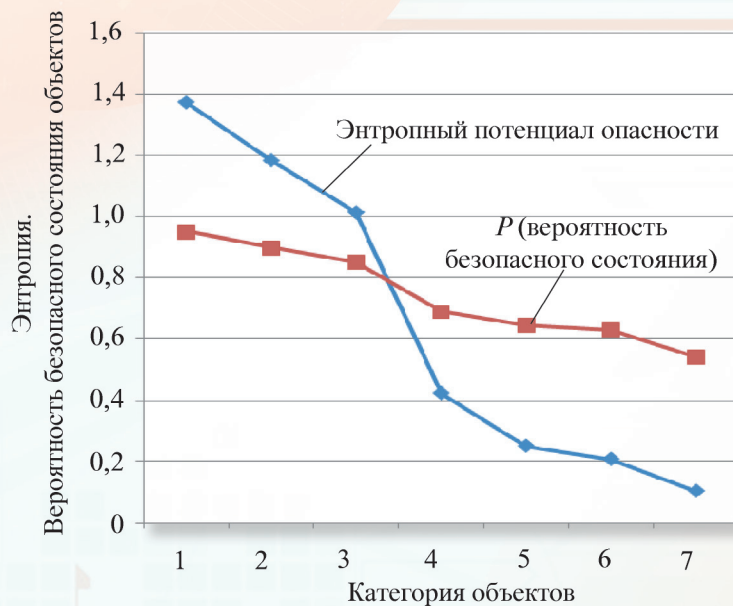


Рис. 3. Энтропия опасности и показатели защищенности объектов

Рисунки к статье В. Н. Костина
**«ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА
 ОПАСНОСТИ КРИТИЧЕСКИ
 ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ
 ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ
 ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ
 НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННО
 ВЕРОЯТНОСТНОГО МЕТОДА
 И ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ»**

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» выпускает научно-технические журналы



Ежемесячный теоретический
и прикладной научно-технический журнал

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

Подписной индекс по Объединенному каталогу
«Пресса России» – 72656



Научно-практический
и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

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

Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79963

Ежемесячный
междисциплинарный
теоретический и прикладной
научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

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



Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79493



Ежемесячный теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

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

Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79492

Теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

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



Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 22765

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:

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