

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

№ 4 (48)

2018

СОДЕРЖАНИЕ

Безяев В. С. АО «НПП «Рубин» – 65 лет создания средств вычислительной техники, систем и комплексов управления	5
---	---

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

Сергина И. Г., Старостин Е. В. Многопрофильная обработка данных наземным комплексом обработки и дешифрирования информации	10
Бабищ М. Ю., Бабищ А. М. Аппарат моделирования особого периода функционирования многоагентных специализированных систем	17
Никишин К. И., Коннов Н. Н., Гуринов Е. И. Усовершенствованный механизм передачи трафика жесткого реального времени в сети Ethernet.....	28
Дубинин В. Н., Беззатеев И. А., Войнов А. С., Сенокосов И. В. Моделирование и реализация распределенных семафоров в архитектуре IEC 61499 на основе протоколов для достижения консенсуса в сети ненадежных процессов.....	39
Юнин А. П., Иванов А. И., Ратников К. А., Кольчугина Е. А. Оценка качества «белого» шума: реализация теста «стаи обезьян» через множество сверток Хэмминга, построенных для разных систем счисления	54
Майоров А. В., Сомкин С. А., Юнин А. П., Акмаев А. Ж. Оценка стойкости защищенных нейросетевых преобразователей биометрия-код с использованием больших баз синтетических биометрических образов.....	65
Чикрин Д. Е., Егорчев А. А., Голоусов С. В., Савинков П. А., Тумаков Д. Н. Использование динамических рефлексивных графов при решении задач планирования пути и тактического управления роботизированной колесной платформой.....	75
Зябиров Э. В., Аравин А. В., Михайлов С. В., Филлюшкин И. П. Выбор вида и параметров стробов при отождествлении координатной информации от средств обнаружения воздушных целей в комплексе средств автоматизации батарейного командного пункта	88
Кольчугина Е. А. Биоинспирированные методы саморазработки программ для распределенных систем.....	96

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

<i>Семенов А. О., Коннов Н. Н., Гурин Е. И.</i> Об использовании алгоритмов стохастической диспетчеризации очередей в сетевом коммутаторе.....	105
<i>Куц Л. В., Говор Т. А., Качалин С. В.</i> Применение современных телекоммуникационных решений при организации связи в мобильных узлах	118
<i>Квашенников В. В., Шабанов А. К., Зайцев П. И.</i> Способ эффективного кодирования команд телекодированного управления.....	124
<i>Белов А. С., Шумилин В. С., Казенов И. Д.</i> Обобщенная комплексная математическая модель распределенной сети связи	131

**UNIVERSITY PROCEEDINGS
VOLGA REGION
ENGINEERING SCIENCES**

№ 4 (48)

2018

CONTENT

Bezyaev V. S. AO "RPE" "Rubin" JSC - 65 years of producing computing equipment, control systems and complexes	5
---	---

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER
ENGINEERING AND CONTROL**

Sergina I. G., Starostin E. V. Diversified data processing by a ground information processing and decoding system	10
Babich M. Yu., Babich A. M. A modeling apparatus of a special period of multi-agent specialized systems functioning	17
Nikishin K. I., Konnov N. N., Gurin E. I. An improved mechanism of transmission of hard real-time traffic in the Ethernet	28
Dubin V. N., Bezzateev I. A., Voynov A. S., Senokosov I. V. Modelling and implementation of distributed semaphores in the IEC 61499 architecture on the basis of protocols for solving consensus in a network of unreliable processes	39
Yunin A. P., Ivanov A. I., Ratnikov K. A., Kol'chugina E. A. Quality evaluation of "white" noise: implementation of the "monkeys" test through a set of hamming convolutions constructed for different number systems	54
Mayorov A. V., Somkin S. A., Yunin A. P., Akmaev A. Zh. Estimation of resistance of protected neuronet biometrics-access code converters using large bases of syntetic biometric images.....	65
Chikrin D. E., Egorchev A. A., Golousov S. V., Savinkov P. A., Tumakov D. N. Usage of dynamic reflexive graphs in path planning and tactical control of a robotic wheel platform.....	75
Zyabirov E. V., Aravin A. V., Mikhaylov S. V., Filyushkin I. P. The choice of the form and parameters of strobes at the identification of coordinate information from air target sensors in a complex of automation equipment of a battery command post	88
Kol'chugina E. A. Bioinspired methods of software self-developorment for distributed computer systems	96

ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT AND RADIO ENGINEERING

<i>Semenov A. O., Konnov N. N., Gurin E. I.</i> On using algorithms of stochastic dispatching of queues in a network switcher	105
<i>Kuts L. V., Govor T. A., Kachalin S. V.</i> The use of modern telecommunication solutions in the organization of mobile nodes	118
<i>Kvashennikov V. V., Shabanov A. K., Zaytsev P. I.</i> A method of effective coding of telecode management commands	124
<i>Belov A. S., Shumilin V. S., Kazenov I. D.</i> A generalized complex mathematical model of a distributed communication network	131

АО «НПП «РУБИН» – 65 ЛЕТ СОЗДАНИЯ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ, СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ УПРАВЛЕНИЯ

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Рубин» основано 9 февраля 1953 г. как филиал московского специального конструкторского бюро СКБ-245 и было призвано обеспечить в самое короткое время создание и серийное производство вычислительной техники в стране. Первым значительным успехом нового предприятия является организация под руководством главного конструктора Башира Искандаровича Рамеева выпуска на пензенском заводе САМ (счетно-аналитических машин) малой универсальной цифровой вычислительной машины «Урал», необходимой для оснащения новых вычислительных центров учреждений Академии наук СССР, Минобороны, Минсредмаша, высших учебных заведений и воинских частей, в том числе космодрома Байконур. Машина «Урал-1» была в стране первой серийной машиной, предназначенной для инженерных расчетов, она пользовалась большим спросом.

Другим крупным успехом явилось создание под руководством Николая Сергеевича Николаева уникального сеточного электроинтегратора ЭИ-С, который решал краевые задачи разработки нефтяных месторождений. Решение первой же реальной краевой задачи по оптимизации разработки месторождений нефти в Татарии привело к корректировке проекта с экономическим эффектом в десятки миллионов рублей. С учетом успеха в развитии вычислительной техники в октябре 1958 г. филиал СКБ-245 был преобразован в Научно-исследовательский институт управляющих вычислительных машин (НИИУВМ).

Акционерное общество «НПП «Рубин», как было отмечено, стояло у истоков создания и развития аналоговой и цифровой вычислительной техники в стране, при этом приходилось начинать практически с нуля как разработку элементной и конструктивной базы, так и создание архитектуры и алгоритмов функционирования аналоговых и цифровых машин. В результате на предприятии сформировался уникальный по своим возможностям коллектив высококвалифицированных специалистов различного профиля, включающий инженеров-электриков, программистов, электромехаников, конструкторов, технологов и рабочих высокого разряда. Достаточно сказать, например, что при создании машин полупроводникового ряда «Урал» было разработано, кроме центральных устройств, более 100 типов внешних устройств ввода-вывода, в том числе для объединения машин в комплексы и сопряжения их с каналами связи. При этом параллельно с разработкой устройств и машин велись работы по созданию управляющих и вычислительных комплексов с применением ЭВМ в интересах народного хозяйства и Министерства обороны СССР. И в дальнейшем коллектив предприятия выполнял работы сразу по ряду направлений радиоэлектронного профиля, что позволяло АО «НПП «Рубин» сохранять и укреплять высокий статус разработчика радиоэлектронных устройств и систем на всех этапах своей деятельности.

Вклад Б. И. Рамеева в становление и развитие предприятия и вычислительной техники в стране в целом трудно переоценить. В 1955 г. после назначения его заместителем начальника Пензенского филиала московского СКБ-245 по научно-технической работе незамедлительно была реорганизована структура филиала, образованы два принципиально новых отдела: универсальных и специальных цифровых вычислительных машин (ЦВМ). Под руководством Б. И. Рамеева молодой коллектив разработчиков, состоящий из выпускников ряда вузов и техникумов, откомандированных специалистов СКБ-245, сумел в короткий срок завершить подготовку конструкторской документации для серийного производства машины «Урал». И в 1958 г. с завода САМ в вычислительные центры организаций и войсковых частей были отгружены первые девять серийных машин «Урал».

В Научно-исследовательском институте управляющих вычислительных машин (НИИУВМ) Б. И. Рамеев, теперь уже в должности главного инженера института, возглавил дальнейшие работы по созданию универсальных цифровых ЭВМ большей производительности.

Для ускорения создания ламповых ЭВМ «Урал-2» и «Урал-4» Башир Искандарович прежде всего стремился к максимальной унификации блоков и узлов технических средств ЭВМ. Проектирование машин осуществлялось на основе конструктивно-технологической базы машины «Урал», освоенной уже в серийном производстве. Это не помешало для повышения быстродействия перейти в машине «Урал-2» к ячейкам на пальчиковых лампах, ввести в состав машины ферритовую память, увеличить емкость магнитного барабана и накопителей на магнитной ленте. В машине «Урал-4» впервые в отечественной практике создания ЭВМ была реализована возможность создания гибкой конфигурации внешних устройств машины для решения различного класса задач. В итоге народное хозяйство СССР получило сравнительно недорогие, массовые и эффективные для инженерных и экономических расчетов вычислительные средства.

Наиболее ярко талант главного конструктора Б. И. Рамеева раскрылся при разработке поколения ЭВМ на новой элементной базе с использованием полупроводниковых приборов. Б. И. Рамеевым одним из первых в нашей стране было предложено создать гамму программно-совместимых ЦВМ различной производительности на единой элементной, конструктивной и технологической базе, а также набор совместимых модулей (устройств) для комплектации ряда ЭВМ. В основу создания ряда машин была положена максимальная унификация элементов, узлов, устройств, стандартизация связей (интерфейсов) элементов и узлов машин. Для реализации этих предложений в НИИУВМ было создано специальное структурное подразделение. И с 1964 г. сверхсовременные по тем временам полупроводниковые вычислительные машины «Урал-11» и «Урал-14» выпускались массовыми сериями. В 1968 г. Б. И. Рамеев был переведен на работу в Научно-исследовательский центр электронной вычислительной техники (НИЦЭВТ), но созданная им на предприятии отечественная школа конструирования ЭВМ продолжала плодотворно работать еще долгие годы. В связи с возможностью объединения в многомашинные комплексы машины «Урал-11» и «Урал-14» были широко использованы в создаваемых предприятием автоматизированных системах управления «Банк», «Листопрокат», «Сталь», «Химия», «Строитель», «Корунд», «Лотос-3А».

Выпуск ЭВМ «Урал» способствовал бурному развитию вычислительной техники в стране. Широкое применение машин семейства «Урал» привело к необходимости подготовки специалистов по совершенно новой специальности – программированию: в стране организовывались курсы подготовки специалистов, массовыми тиражами издавались учебники и пособия, разработанные специалистами предприятия, проводились всесоюзные семинары по программированию задач на ЭВМ «Урал». Комплекс унифицированных элементов «Урал-10» большими сериями выпускался на Волжском заводе РТЭ (радиотехнических элементов) и был использован многими организациями в стране для самостоятельного создания устройств дискретной автоматики. По инициативе Б. И. Рамеева была создана лаборатория для разработки автоматов контроля параметров ферритовых сердечников оперативной памяти ряда ЭВМ «Урал». В дальнейшем автоматы совершенствовались с увеличением их производительности и уменьшением размеров сердечников, что способствовало выпуску сердечников в объемах миллионы-миллиарды штук в год для построения оперативной памяти ЭВМ второго и третьего поколений.

В период работы в НИИУВМ Б. И. Рамееву в 1962 г. за заслуги в области создания вычислительной техники по совокупности научных работ была присвоена ученая степень доктора технических наук. В 1966 г. Б. И. Рамеев был награжден орденом Трудового Красного Знамени.

Однако в 1970-е гг. предприятие прекратило разработку универсальных цифровых ЭВМ. Одной из причин, возможно, является неприятие Б. И. Рамеевым и его соратниками концепции копирования структурно-технических и программных решений системы IBM-360 для единого семейства электронных вычислительных машин (ЕС ЭВМ). При выборе дальнейших путей развития отечественных ЭВМ третьего поколения Б. И. Рамеев, будучи заместителем генерального конструктора ЕС ЭВМ и начальником отделения в НИЦЭВТ, был активным сторонником отечественных путей создания ЭВМ третьего поколения. Свою концепцию создания ЭВМ «Урал» третьего поколения в инженерной записке в Минрадиопром СССР представил в 1967 г. и руководство института. После принятия окончательного решения о создании ЕС ЭВМ путем копирования решений IBM-360 Б. И. Рамеев отказался от должности заместителя генерального конструктора ЕС ЭВМ и через некоторое время покинул НИЦЭВТ. Время показало правоту ученого – отечественная вычислительная техника постепенно сошла с передовых позиций, путь копирования стал губительным для ее развития.

В то же время в 1971 г. были завершены работы по созданию системного программного обеспечения ЭВМ «Урал-16» и трансляторов с языков высокого уровня. Одновременно в институте был создан принципиально новый образец машины «Урал-11М» на интегральных микросхемах. В этом же году Минрадиопромом СССР было открыто финансирование работ по созданию машины третьего поколения «Урал-25» с применением интегральных схем, конструктивно-технологической базы ЕС ЭВМ и архитектурных решений ЭВМ «Урал-16». ЭВМ «Урал-25» наилучшим образом отвечала требованиям по ее применению в среднем звене перспективной отраслевой автоматизированной системы управления (ОАСУ) Госбанка СССР и позволяла использовать в ОАСУ программный задел системы «Банк». Однако в середине 1972 г. финансирование разработки ЭВМ «Урал-25» было прекращено из-за ее от-

сутствия в тактико-техническом задании на ЕС ЭВМ. По этой же причине в 1976 г. было прекращено финансирование выполняемых Пензенским научно-исследовательским институтом математических машин (ПНИИММ) работ по созданию многопроцессорного вычислительного комплекса для системы управления воздушным движением.

Но второй причиной, не менее, а может быть, и более важной, был тот факт, что на рубеже 1960–1970-х гг. стране уже требовались не отдельные ЭВМ и даже комплексы ЭВМ, а высокопроизводительные и надежные иерархические сетевые автоматизированные системы управления. Создание таких систем было по силам далеко не каждому предприятию, и ПНИИММ попал в мощный поток заказов по данному направлению.

Коллектив предприятия активно включился в работы по созданию ОАСУ Госбанка СССР, стационарных и мобильных пунктов управления войсками и оружием в интересах Вооруженных сил СССР, ряда других масштабных проектов. В то же время не прекращалась разработка различных специализированных вычислителей и комплексов, требуемых для построения разрабатываемых автоматизированных систем. Так, научно-технический задел машины «Урал-11М» был использован при разработке специализированной ЭВМ для фотограмметрического комплекса «Аналит». ПНИИММ стал головным предприятием Минрадиопрома СССР по разработке устройств оптоэлектроники и робототехники. Главные конструкторы ряда изделий – А. С. Горшков, В. Г. Желнов, Н. С. Николаев с группой разработчиков – стали лауреатами государственных премий СССР по науке и технике, предприятие в 1981 г. было награждено орденом Трудового Красного Знамени, многие работники и специалисты предприятия отмечены высокими правительственными наградами.

Сегодня АО «НПП «Рубин» является одним из ведущих предприятий в корпорации «Ростех» по разработке и производству автоматизированных систем и комплексов управления, телекоммуникационных средств и сетей связи специального назначения, программных и программно-технических комплексов. Важное место в деятельности предприятия занимают разработка и серийный выпуск систем и комплексов управления для подразделений противовоздушной обороны, ракетных войск и артиллерии, материально-технического обеспечения тактического звена, а также мобильных телекоммуникационных комплексов для Министерства обороны РФ и других силовых структур. Высокий уровень продукции предприятия подтвержден получением ее разработчиками за последние пять лет двух государственных премий имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова, Национальной премии «Золотая идея» Федеральной службы военно-технического сотрудничества за вклад в экспортную продукцию, неоднократным назначением коллективам разработчиков стипендий Минпромторга РФ за выдающиеся достижения в создании прорывных технологий и разработку современных образцов вооружения, военной и специальной техники в интересах обеспечения обороны страны и безопасности государства.

За последнее десятилетие АО «НПП «Рубин» значительно повысило свой статус разработчика и поставщика радиоэлектронной продукции, существенно укрепило свое финансово-экономическое положение по следующим причинам:

1. Изменилось отношение к оборонным предприятиям. Стало очевидным, что без технического перевооружения оборонных предприятий, выпускающих новую военную технику и вооружение, нельзя обеспечить безопасность государства. АО «НПП «Рубин» в числе других предприятий получило по федеральным целевым программам бюджетное финансирование для модернизации научно-производственной и технологической базы.

2. Возросли объемы госзаказа на предприятии на разработку и поставку систем и комплексов управления вооружением и военной техникой. Этому способствовали мобилизация всего коллектива на безусловное выполнение госзаказа в срок и с высоким качеством, строгое соблюдение технологической дисциплины, организация технического надзора за продукцией на объектах эксплуатации. И, как результат, выигрыш в проводимых конкурсах и получение госзаказов от Минобороны и других силовых структур.

3. Повысилась ответственность предприятия за качество продукции. АО «НПП «Рубин» как головное предприятие выпускает сложную наукоемкую продукцию с привлечением целого ряда предприятий-поставщиков комплектующих изделий (транспортной базы, средств связи, электропитания и жизнеобеспечения и т.д.). Для повышения качества головного изделия предприятие вынуждено проводить во время входного контроля дополнительную технологическую тренировку комплектующих изделий, искать замену недобросовестным поставщикам.

4. Высокая трудовая дисциплина работников предприятия. АО «НПП «Рубин» поставляет свою продукцию по всей территории России и за рубеж, проводит сдачу в эксплуатацию и гарантийное обслуживание поставляемой техники, что невозможно без высокой ответственности каждого за порученное дело. Все это, безусловно, повышает репутацию предприятия как добросовестного поставщика продукции.

На предприятии трудится слаженный высококвалифицированный коллектив: более 40 докторов и кандидатов технических и экономических наук, высококвалифицированные специалисты с многолетним опытом работы по созданию комплексов и систем и молодые инженеры, успешно применяющие современные информационные технологии для автоматизации процессов управления. Коллектив предприятия заинтересован в результатах своего труда и деятельности предприятия в целом.

Акционерной общество «НПП «Рубин», отмечая 65-летие, по своему научно-техническому потенциалу способно и далее быть в авангарде создания и выпуска конкурентоспособных радиоэлектронных изделий, систем и комплексов управления и связи, уверенно смотрит в будущее и открыто для научно-технического сотрудничества с любым потенциальным отечественным или зарубежным заказчиком.

Безяев Виктор Степанович

генеральный директор,
Научно-производственное
предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 623.746.2

DOI 10.21685/2072-3059-2018-4-1

И. Г. Сергина, Е. В. Старостин

МНОГОПРОФИЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ НАЗЕМНЫМ КОМПЛЕКСОМ ОБРАБОТКИ И ДЕШИФРИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования является наземный комплекс обработки и дешифрирования информации, предназначенный для выдачи результатов анализа в виде таблиц распределения данных по типам и временным интервалам. Предметом исследования являются обработка информации наземным комплексом обработки и дешифрирования информации, позволяющая во всем объеме провести анализ постполетных данных. Цель работы – представление радиолокационных данных различными методами, обеспечивающими высокое качество анализа.

Материалы и методы. Наземный комплекс обработки и дешифрирования информации выполняет анализ состава зарегистрированной бортовыми накопителями информации. Вся информация, регистрируемая бортовыми накопителями, разделена на следующие группы: звуковая, графическая, навигационная и информация о трассах объектов, различные зарегистрированные сообщения.

Результаты. Для обеспечения высокого качества анализа наземный комплекс обработки и дешифрирования информации осуществляет анализ радиолокационных данных следующими компонентами: табличное, графическое, статическое, динамическое представление, представление видео- и звуковой информации.

Выводы. Представление радиолокационных данных различными методами, обеспечивающими высокое качество анализа, позволило сделать выводы о том, что различные виды обработки и представления данных позволяют полностью обработать постполетную информацию и провести многосторонний анализ.

Ключевые слова: обработка данных, табличная обработка, трассовая информация, представление данных.

I. G. Sergina, E. V. Starostin

DIVERSIFIED DATA PROCESSING BY A GROUND INFORMATION PROCESSING AND DECODING SYSTEM

© Сергина И. Г., Старостин Е. В., 2018. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Abstract.

Background. The research deals with the study of the information processing and decoding ground system, intended for presenting delivery the results of the analysis in the form of tables of data allocation maps according to types and time frames. The subject of the research is data processing by the information processing and decoding ground system, allowing carrying out analysis of post-flight data at large. The purpose of the study is to radar data presentation different methods, providing high quality of the analysis.

Materials and methods. The information processing and decoding ground system makes the analysis of structure of information registered by onboard information tanks. All information registered by onboard information tanks is divided into the following groups: sound, graphic, navigation and about routes of objects, various registered messages.

Results. To provide high quality of analysis, the information processing and decoding ground system carries out analysis of radar data with the following components: tabular, graphical, static, dynamic representation, representation of video and sound information.

Conclusions. Representation of radar data by different methods providing high quality of the analysis has allowed drawing conclusions that different types of data processing and presentation enables to complete post-flight information processing and to carry out the multianalysis.

Keywords: data processing, tabular processing, route information, data presentation.

Авиационные системы дальнего радиолокационного обнаружения (ДРЛО) предназначены для обнаружения и сопровождения воздушных целей на малых и больших высотах. Комплекс ДРЛО имеет аппаратные средства протоколирования полета на внешних носителях данных. Наземный комплекс обработки и дешифрирования информации (НКОД) выполняет анализ состава зарегистрированной бортовыми накопителями информации, ее сортировку по типу донесений и в соответствии с заданными оператором признаками привязку к полетному времени [1]. Вся информация, регистрируемая бортовыми накопителями, может быть разделена на следующие группы:

- 1) звуковая информация (переговоры лиц расчета);
- 2) графическая информация, зарегистрированная с мониторов рабочих мест;
- 3) навигационная информация и информация о трассах объектов;
- 4) различные зарегистрированные сообщения.

НКОД предназначен для выдачи результатов анализа в виде таблиц распределения данных по типам и временным интервалам. Как показывает опыт эксплуатации, табличное отображение не всегда удобно и не позволяет полностью оценить обстановку [2]. Поэтому в НКОД предусмотрена возможность отображения графиков зависимости параметров от времени, статического и динамического отображения зарегистрированной оперативно-тактической информации с привязкой к полетному времени и к электронной карте подстилающей поверхности с воспроизведением фонограмм переговоров лиц расчета [3].

При обработке данных возникает проблема анализа радиолокационных данных. Одной табличной обработки в таком случае недостаточно, требуется представить данные различными методами. Для обеспечения высокого

качества анализа предложена обработка данных НКОД, осуществляемая несколькими компонентами (рис. 1).

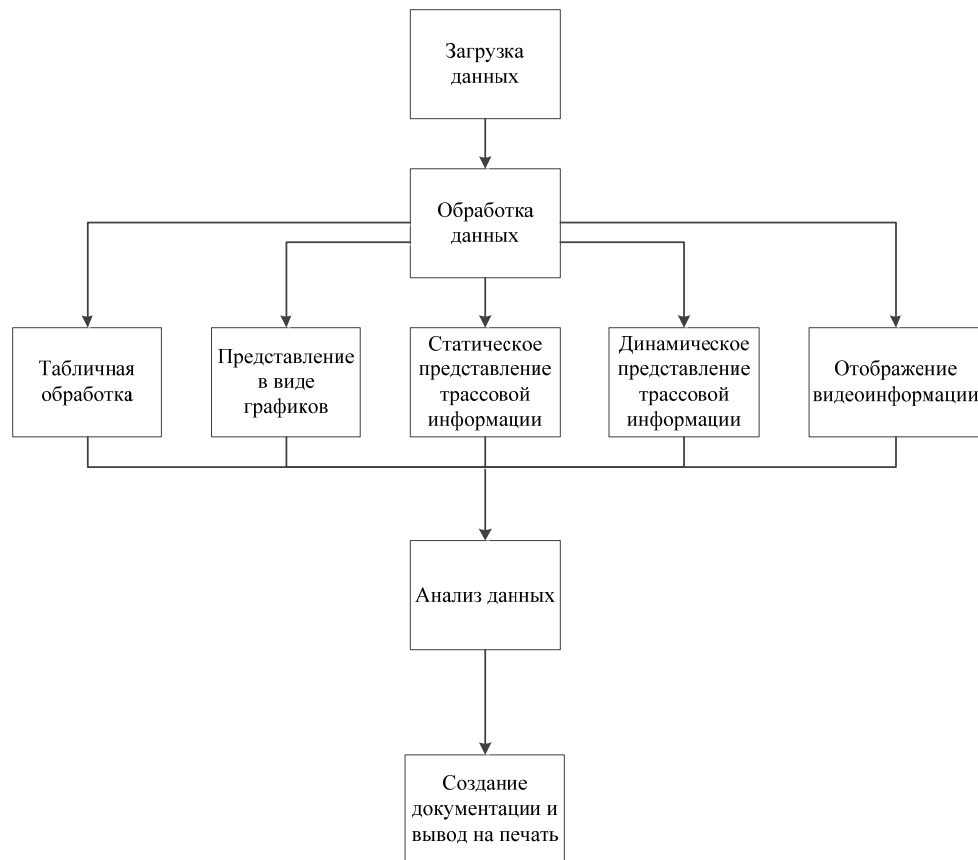


Рис. 1. Схема обработки данных НКОД

1. Табличная обработка данных (рис. 2).

При табличной обработке данных осуществляются селекция, сортировка входных данных и отображение результатов в табличном виде. Кроме простого табличного представления, есть возможность отобразить несколько параметров различных типов данных в одной таблице в виде строк, сортированных по выбранному параметру. Смешанное табличное представление дает возможность селекции данных по заданным общим полям, а также возможность производить сортировку данных по общим полям [4].

При большом количестве строк в таблице время процедуры загрузки информации из базы данных и ее отображения в НКОД составляет десятки минут, поэтому разработчиками НКОД был предложен метод постраничной загрузки.

Страница – данные, представленные в таблице. Каждая страница состоит из строк, выводимых на экран, и строк, хранящихся в памяти для плавной «прокрутки» таблицы при отображении оператору. При прокрутке страницы на данные, предназначенные для плавной загрузки, загрузки из базы данных не происходит, данные загружаются при отображении следующей страницы,

т.е. каждая страница состоит из сообщений, выводимых на экран и хранящихся в памяти для плавной загрузки строк (рис. 3). Таким образом, в оперативной памяти находится только часть таблицы.

Высота радиолокационная, м	Доверительный интервал по плоскостным координатам, м	Доверительный интервал по высоте, м	Составляющая скорости по X, м/с	Составляющая скорости по Y, м/с	Модуль скорости по плоскостным координатам, м/с
7954,414	0,000	0,000	98,844	173,186	199,498
7956,578	0,000	0,000	98,670	173,235	199,441
7958,018	0,000	0,000	98,438	173,241	199,328
7959,004	0,000	0,000	98,215	173,374	199,330
7959,904	0,000	0,000	97,927	173,446	199,246
7960,098	0,000	0,000	97,861	173,450	199,218
7960,123	0,000	0,000	97,738	173,587	199,277
7960,566	0,000	0,000	97,430	173,600	199,137
7960,849	0,000	0,000	97,238	173,677	199,110
7962,322	0,000	0,000	96,867	173,760	199,000
7963,454	0,000	0,000	96,744	173,831	199,003
7964,315	0,000	0,000	96,498	173,907	198,949
7964,781	0,000	0,000	96,321	173,847	198,808
7965,330	0,000	0,000	96,265	173,846	198,780
7966,106	0,000	0,000	96,276	173,776	198,722
7966,622	0,000	0,000	96,262	173,846	198,780
7967,292	0,000	0,000	96,224	173,728	198,664
7968,349	0,000	0,000	96,282	173,660	198,634
7969,639	0,000	0,000	96,326	173,531	198,546
7970,362	0,000	0,000	96,348	173,456	198,488

Рис. 2. Пример табличной обработки данных

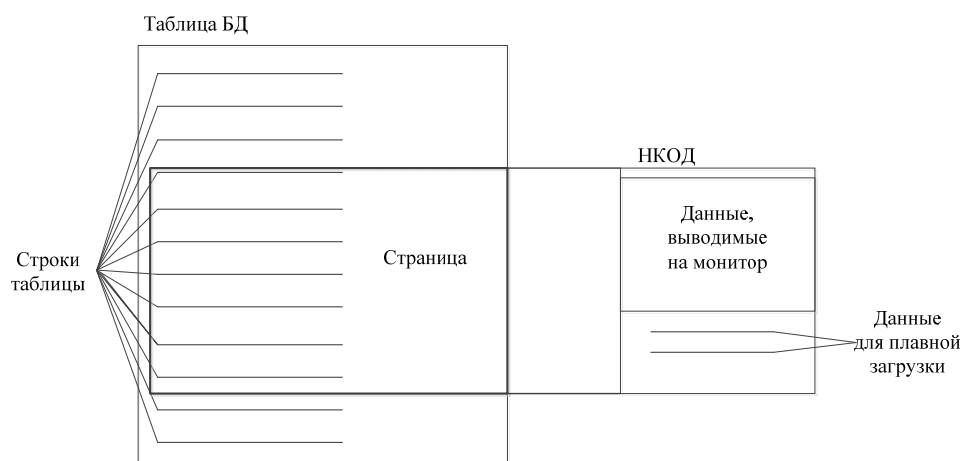


Рис. 3. Загрузка таблицы в НКОД

Данный метод динамической подгрузки при табличной обработке информации позволяет оптимизировать процесс обращения к оперативной памяти.

ти и вычислительным ресурсам компьютера по сравнению с традиционными методами обработки информации.

2. Обработка табличной информации в виде графиков (рис. 4).

Табличная информация может быть представлена в виде графиков зависимости полей анализируемых данных от времени. Графики позволяют наглядно проанализировать изменения выбранных параметров во время полета (рис. 4).

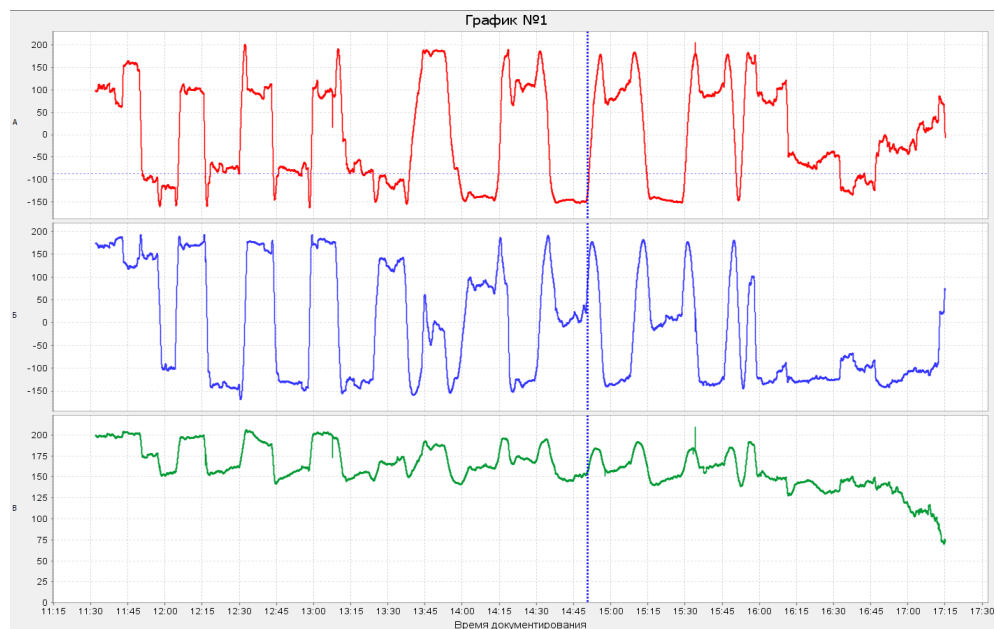


Рис. 4. Пример представления информации в виде графиков

3. Статическое представление данных (рис. 5).

При работе оператора с графическим статическим представлением трассовой информации выводится оперативно-тактическая обстановка, отображаемая в виде трасс зарегистрированных объектов с возможностью распознавания типа объекта, его государственной принадлежности, азимута и дальности его местоположения от выбранной условной точки.

Оператор имеет возможность управлять отображением:

- селекция трасс, выводимых на отображение по задаваемым признакам;
- получение полной информации об объекте, выбранной трассе в конкретный момент времени;
- определение расстояния между объектами и носителем, отображение информации на фоне цифровой карты местности и азимутально-дальностной сетки с возможностью изменения масштаба отображения.

4. Динамическое представление данных (рис. 6).

В отличие от статического представления данных, в динамическом представлении выводится оперативно-тактическая обстановка, отображаемая в виде трасс зарегистрированных объектов и пеленгов, в определенный момент времени с регулируемой скоростью. При получении оперативно-тактической информации в реальном режиме времени воспроизводятся звуковые файлы (переговоры лиц расчета).

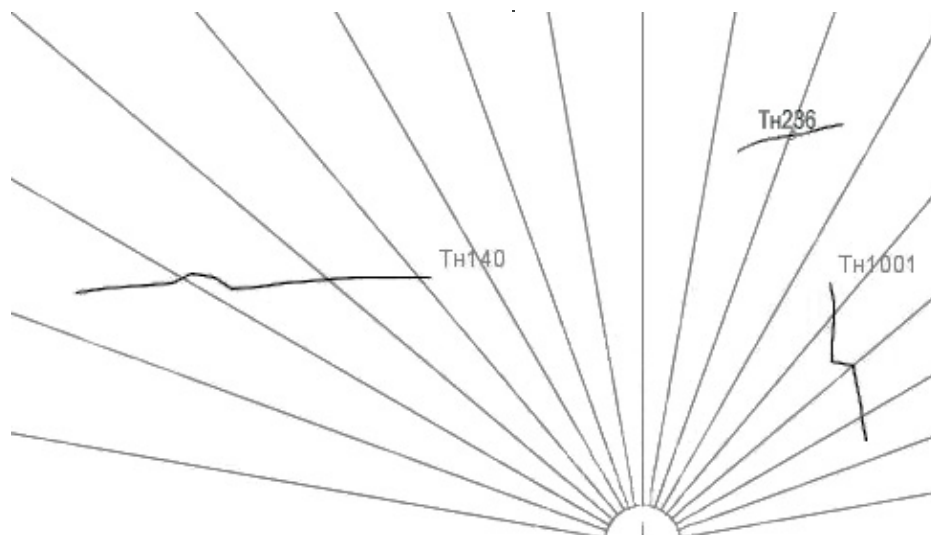


Рис. 5. Статическое представление трассовой информации

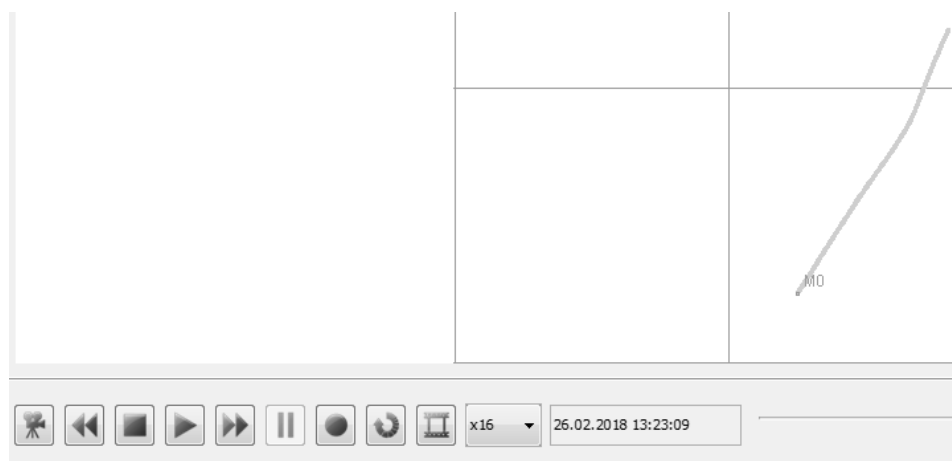


Рис. 6. Пример динамического представления данных

5. Представление видео- и звуковой информации осуществляется путем отображения видеoinформации, зарегистрированной с мониторов рабочих мест лиц расчета боевого управления в виде jpg-файлов с синхронным воспроизведением звуковой информации с одного или нескольких рабочих мест.

В динамическом и видеопредставлении реализована возможность работы с «закладками», которая позволяет выделять необходимые фрагменты отображаемой информации с целью их последующего повторного просмотра и анализа.

Таким образом, предложенные несколько видов обработки и представления данных позволяют полностью обработать постполетную информацию и провести ее многосторонний анализ.

Библиографический список

1. **Коннов, Н. Н.** Система для расшифровки и анализа данных объективного контроля радиолокационного комплекса / Н. Н. Коннов, Д. В. Пашенко,

- Г. М. Морозов, А. В. Васильев // Новые информационные технологии и системы : тр. 8-й Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2008. – С. 274–281.
2. **Турыгин, И. Г.** К вопросу о разработке информационной оболочки базы знаний наземного комплекса обработки и дешифрования информации / И. Г. Турыгин, И. Г. Турыгина // Вопросы радиоэлектроники. – 2016. – № 12. – С. 18–25.
3. **Пащенко, Д. В.** Способ анализа динамического отображения информации в авиационных комплексах радиолокационного дозора и наведения / Д. В. Пащенко // Вопросы радиоэлектроники. – 2011. – № 2. – С. 84–91.
4. **Пащенко, Д. В.** Табличная обработка информации, зарегистрированной авиационным радиолокационным комплексом / Д. В. Пащенко, Д. А. Трокоз // Вопросы радиоэлектроники. – 2009. – № 4. – С. 139–141.

References

1. Konnov N. N., Pashchenko D. V., Morozov G. M., Vasil'ev A. V. *Novye informatsionnye tekhnologii i sistemy: tr. 8-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [New information technologies and systems: proceedings of VIII International scientific and technical conference]. Penza: Izd-vo PGU, 2008, pp. 274–281.
2. Turygin I. G., Turygina I. G. *Voprosy radioelektroniki* [Issues of radio electronics]. 2016, no. 12, pp. 18–25.
3. Pashchenko D. V. *Voprosy radioelektroniki* [Issues of radio electronics]. 2011, no. 2, pp. 84–91.
4. Pashchenko D. V., Trokoz D. A. *Voprosy radioelektroniki* [Issues of radio electronics]. 2009, no. 4, pp. 139–141.

Сергина Ирина Геннадьевна

инженер-программист, Научно-производственное предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: tig9477@ya.ru

Sergina Irina Gennad'evna

Software engineer, Research and Production Enterprise «Rubin»
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

Старостин Евгений Владимирович

инженер-программист, Научно-производственное предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: ibmibm58@gmail.com

Starostin Evgeniy Vladimirovich

Software engineer, Research and Production Enterprise «Rubin»
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

УДК 623.746.2

Сергина, И. Г.

Многопрофильная обработка данных наземным комплексом обработки и дешифрования информации / И. Г. Сергина, Е. В. Старостин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 4 (48). – С. 10–16. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-4-1.

АППАРАТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСОБОГО ПЕРИОДА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МНОГОАГЕНТНЫХ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом изучения являются многоагентные организационно-технические системы специального назначения. В качестве рационального, интеллектуального в слабом смысле агента рассматривается человек или человек, управляющий техническим средством. Такие системы обладают особым периодом функционирования – периодом хаоса. Целью работы является создание аппарата моделирования периода хаоса.

Материалы и методы. В качестве аппарата моделирования особого периода рассматривается NK -автомат Кауфмана. Автомат представим в виде бинарной сети с N вершинами и K входными дугами для каждой вершины. Аналогом периода хаоса является повторяющийся цикл состояний автомата, в который автомат может входить в силу конечного числа своих состояний. Для моделирования функционирования рассматриваемых систем предлагается модифицировать NK -автомат. Приводится самое общее определение понятия системы, из которого следуют необходимые изменения в работе и в ограничениях NK -автомата.

Результаты. Предлагается реализация модифицированного NK -автомата, для которого основными отличиями являются измененное распределение булевых функций между вершинами NK -автомата и измененное понятие состояния NK -автомата. Проводились эксперименты с ансамблем из 3500 модифицированных NK -автоматов, состоящих из 10, 30, 50, 75 и 100 вершин, при значении K от 2 до 5. В качестве примера приводятся результаты эксперимента для модифицированного NK -автомата из 30 вершин.

Выводы. Установлено, что модифицированные NK -автоматы являются аппаратом моделирования особого, близкого к хаосу периода функционирования многоагентных специализированных систем.

Ключевые слова: многоагентная система, рациональный агент, NK -автомат Кауфмана, синергетика, период хаоса.

М. Yu. Babich, A. M. Babich

A MODELING APPARATUS OF A SPECIAL PERIOD OF MULTI-AGENT SPECIALIZED SYSTEMS FUNCTIONING

Abstract.

Background. The object of study is multi-agent organizational and technical systems for special purposes. A rational, intellectual, in the weak meaning, agent is considered to be a person or a person controlling technical facilities. These systems

have a special operation period - the chaos period. The purpose of the work is to create a chaos period modeling apparatus.

Materials and methods. The Kaufmann NK-automaton is considered as the special period modeling apparatus. The automaton is represented as a binary network with N vertices and K input arcs for each vertex. An analogue of the chaos period is the repeated states cycle of the automaton, in which the automaton can enter on the strength of a finite number of its states. It is proposed to modify the NK automaton for simulation of the considered systems functioning. The most general definition of the concept of a system is given; from this follows the necessary changes in the work and in the limitations of the NK automaton.

Results. Proposed the realization of a modified NK automaton, for which the main differences are the changed distribution of Boolean functions between vertices of the NK automaton and the changed notion of the state of the NK automaton. Experiments were conducted with an ensemble of 3500 modified NK automata, consisting of 10, 30, 50, 75 and 100 vertices, with a value of K from 2 to 5. As an example, the results of an experiment for a modified NK automaton of 30 vertices are given.

Conclusions. It is established that the modified NK automata are the apparatus for modeling of the special, close to chaos period of the multiagent specialized systems operation.

Keywords: multi-agent system, rational agent, Kaufmann NK-automaton, synergetics, chaos period.

Организационно-технические системы специального назначения – искусственные системы, объединяющие организационные, технические, управленческие, методические подсистемы, функционирующие в силовых структурах или в предметных областях, близких к ним [1]. Обозначим через S многоагентную организационно-техническую систему, где агенты a являются рациональными интеллектуальными агентами в слабом смысле, т.е. агентами, которые обладают свойствами автономности, реактивности, общественного поведения (способность функционировать в сообществе с другими агентами) и про-активностью (способностью генерировать цели и достигать их). Определение рационального агента со временем уточняется и обобщается [2–8]. В качестве агентов a из множества A будем рассматривать людей – должностных лиц или людей, управляющих техническим устройством. Агенты a действуют в контуре системы S , т.е. агенты a принадлежат системе, но в силу их важности мы выделяем их в отдельное множество (но не в подсистему) A . Так как рассматриваемые системы могут быть разделены на подсистемы, важно отметить, что сами агенты из-за сложности ментальных свойств человека и организации технических устройств также являются подсистемами, но для нас – подсистемами, не делящимися на другие подсистемы и ограничивающими рассматриваемый класс систем снизу. Одной из важных подсистем, входящей в контур системы S , является подсистема управления (ПУ). Среду, в которой функционирует система S , обозначим через C . Через $S(t)$, $C(t)$, $a(t)$ или $A(t)$ будем обозначать состояния системы, среды, агента или всех агентов в момент времени t . ПУ имеет возможность сканировать состояние системы и среды через подсистему наблюдения. Таким образом, ПУ известны состояния $S'(t)$, $C'(t)$, $A'(t)$, которые отличаются от истинных состояний $S(t)$, $C(t)$, $A(t)$. Чем больше полнота и точность данных, получаемых от подсистемы наблюдения, тем меньше погрешности $p(S'(t), S(t))$, $p(C'(t), C(t))$, $p(A'(t), A(t))$, где p –

мера близости. Организационно-технические системы создаются ради достижения ими некоторой цели P_S . Конечная цель P_S известна ПУ. Агенты, входящие в ПУ, т.е. лица, принимающие решение, исходя из цели P_S и состояний $S(t)$, $C(t)$, $A(t)$ определяют цели P_a агентам a или подсистемам, куда входят агенты, но пути достижения целей P_a агенты определяют сами – имеет место мягкое управление агентами. Для систем S , близких к системам силовых структур, можно рассматривать агентов двух типов. В таких системах имеются две ПУ. Второй тип агентов имеет свою ПУ, но цели, состояние ПУ и самих агентов, а также состояние подсистемы, куда входят агенты второго типа, неизвестны или известны, но с очень большой погрешностью.

Системы рассматриваемого класса создаются для функционирования в трех периодах. Назовем их *обычный*, *переходный* и *особый периоды* функционирования. Они отличаются различным горизонтом прогноза. Если в обычном периоде горизонт прогноза достаточен для построения моделей функционирования системы и определения через заданное время состояний $S(t)$, $C(t)$, $A(t)$, то в особом периоде он чрезвычайно мал. Например, для систем Министерства по чрезвычайным ситуациям обычный период – это период отсутствия чрезвычайной ситуации. В нем происходят накопление необходимых ресурсов, обучение агентов, имитации чрезвычайных ситуаций. Особый период – это период реальной чрезвычайной ситуации. По сравнению с обычным периодом он скоротечен, требует привлечения больших ресурсов и организации спасательных работ.

Чем характеризуется особый период? Количество параметров и переменных, требуемых для учета их в моделях функционирования системы S , резко увеличивается, а полнота и точность информации в ПУ, приходящей из подсистемы наблюдения, резко уменьшаются. Имеют место ситуации, когда благодаря незначительной неточности или отсутствию ранее не учтенного параметра возникают непредвидимые состояния $S(t)$, $C(t)$, $A(t)$, что не позволяет агентам достичь цели P_a , а системе – цели P_S . Такое состояние системы и внешней среды в работах [9, 10] определено как состояние хаоса. Состояние хаоса не является необычным состоянием. Находящаяся в этом состоянии система в конце концов достигает устойчивого состояния – аттрактора. Для рассматриваемых систем – это успешное достижение цели P_S в рамках особого периода и затем наступление первого периода функционирования. Моделирование функционирования систем и прогнозирование их состояния в период хаоса затруднены, имеют свою специфику, но возможны. Таким образом, изучение функционирования и прогнозирование состояния рассматриваемых систем S требуют создания и использования некоторого математического и имитационного аппарата моделирования состояния хаоса.

В работах [9–13] в рамках синергетических исследований показано, что динамика сложных систем и, следовательно, наступление состояния хаоса могут быть описаны несложными нелинейными уравнениями.

Более подробно рассмотрим алгоритм функционирования рассматриваемых систем S .

После получения задачи достижения цели P_S ПУ анализирует текущие состояния $S(t)$, $C(t)$, $A(t)$, определяет цели P_a и распределяет задачи достижения целей по агентам a . Агенты a , исходя из состояния подсистемы S_a , куда входит агент, среды C_a , влияющей на агента, своего состояния $a(t)$, состояния

других агентов, определяет алгоритм достижения цели P_a и пытается его реализовать. Исходя из реализуемого алгоритма агент осуществляет выбор одного из возможных действий агента и реализацию действия, что, возможно, приближает к достижению цели P_a . Это оказывает влияние на состояние системы, среды, агентов. Аналогично поступают другие агенты. С учетом действия других агентов, изменяющих значения $S_a(t), C_a(t), a(t)$, для агента a возникает новая ситуация $S_a(t+1), C_a(t+1), a(t+1)$, которая вновь анализируется, после чего уточняется алгоритм достижения цели и осуществляется следующий шаг алгоритма. Для ПУ траектория изменения состояний всей системы и среды на интервале $[t_0, t_n]$ выглядит как

$$(S(t_0), C(t_0), A(t_0)), (S(t_1), C(t_1), A(t_1)), \dots, (S(t_n), C(t_n), A(t_n))), \quad (1)$$

а для агента –

$$(S_a(t_0), C_a(t_0), a(t_0)), (S_a(t_1), C_a(t_1), a(t_1)), \dots, (S_a(t_n), C_a(t_n), a(t_n))), \quad (2)$$

где время t_n – это предполагаемое время достижения цели.

Как было отмечено, выбранные действия агентов из A определяют новую ситуацию $S(t_{i+1}), C(t_{i+1}), A(t_{i+1})$, которая возникает из ситуации $S(t_i), C(t_i), A(t_i)$ в результате реализации выбранных действий всех агентов. Кроме того, существуют возможные ситуации, которые могли быть, если бы агенты выбрали другие возможные действия. Ситуация $S(t_{i+1}), C(t_{i+1}),$

$A(t_{i+1})$ – одна из возможных ситуаций из числа $\prod_{j=1}^M d_j(t_i)$, где M – число

агентов; $d_j(t_i)$ – число доступных для реализации действий агента j в текущей ситуации во время t_i . Ситуации, отличные от $S(t_{i+1}), C(t_{i+1}), A(t_{i+1})$, могли быть, но не возникли вследствие того, что агенты реализовали лишь одно конкретное действие из возможных. Таким образом, теоретически траектория достижения цели (1) при конкретных действиях агентов может быть представлена в качестве пути на ориентированном графе, включающем все возможные действия агентов и состояния $S(t), C(t), A(t)$, теоретически потому, что количество возможных, но нереализованных действий может быть достаточно большим (можно сравнить с действиями всего лишь двух соперников в шахматной игре). Если изменение обобщенных состояний при большом количестве агентов (например, движение толпы) и части среды, мало зависящей от действий агентов, можно формализовать уравнением, то формализовать выбор действий для нескольких агентов и их последствия затруднительно. Выбор действия агентов, обладающих своим менталитетом и опытом, в период неполной и неточной информации может быть непредсказуем. То есть описание хаоса нелинейным уравнением в нашем случае может быть не совсем адекватно реальности [1, 14].

В работах [15, 16] для моделирования состояния хаоса была предложена булева NK -сеть, или NK -автомат Кауфмана. NK -автомат Кауфмана состоит из N элементов (вершин). Каждый элемент имеет не более K входов или входных дуг, соединяющих вершину с другими K вершинами. Вершина может быть активна и принимает значение 1 или пассивна – значение 0. Каждой

вершине NK -автомата соответствует некоторая булева функция, которая определяет динамическое поведение вершины, т.е. ее активность или пассивность. Булева функция вершины является логическим правилом переключения. Обозначим последовательность состояний входных вершин для вершины i через $y_i = (r_1, r_2, \dots, r_K)$, где r_j может принимать значение 0 или 1. У каждой вершины на входе может быть не более 2^K вариантов значений y_i . Булева функция определяет, какие значения y_i переводят вершину i в активное состояние. Все элементы NK -автомата срабатывают одновременно. Состояние всего NK -автомата определяется значением $Y = (r_1, r_2, \dots, r_N)$, т.е. последовательностью, каждый элемент которой отражает активность или пассивность вершины NK -автомата. Если Y^0 – это начальное распределение активности вершин NK -автомата, то состояние NK -автомата будет изменяться по траектории Y^0, Y^1, Y^2 и т.д. Так как количество вершин на протяжении работы NK -автомата не изменяется и является конечным, то количество состояний NK -автомата также конечно. Это означает, что последовательность смены состояний NK -автомата должна войти в повторяющийся цикл:

$$\exists T : Y^{T+t} = Y^{t+t}, i \leq T, t \in (0, 1, 2, \dots, \infty). \quad (3)$$

Повторяющиеся последовательности или предельные циклы, в которые попадает NK -автомат, рассматриваются в качестве аттракторов. Переход к хаосу моделируется долгим недостижением аттрактора. Например, при достаточном увеличении значений N и K , несмотря на обязательное выполнение (3), в процессе функционирования NK -автомата на разумном интервале времени $[t_0, t^*]$ значение T может быть недостижимо, т.е. $T > t^*$. Кауфманом было определено, что NK -автомат сохраняет свои основные свойства при изменении начальной активности Y^0 , связей между вершинами, булевых функций. Основные свойства NK -автомата определяются значениями N и K : при $K = 1$ поведение можно рассматривать как упорядоченное, при $K = 2$ – как неустойчивое на границе хаоса (длина циклов незначительна), при $K = 3$ поведение NK -автомата изменяется – длина циклов резко увеличивается, т.е. можно наблюдать наступление состояния хаоса.

Впервые NK -автоматы были использованы в рамках исследований биологической эволюции в качестве модели, регулирующей генетические системы в живых клетках. Тем не менее NK -автомат можно рассматривать как основу аппарата моделирования для сложных систем, чьи изменения состояний представимы в виде ориентированных графов. Как всякая основа NK -автомат не может удовлетворять всем требованиям, предъявляемым в рамках тех или иных исследований, и требует расширения правил своего создания и функционирования [17, 18].

Рассмотрим самые общие необходимые изменения.

Если руководствоваться, на наш взгляд, самым общим определением системы [19, 20], то система – это единство первичных элементов, построенное по заданным отношениям с наложенными на них ограничениями. NK -автоматы полностью удовлетворяют такому определению. При вхождении в период хаоса система должна терять свою устойчивость. Следуя [20], под устойчивостью будем понимать свойство системы совпадать по своим признакам до и после изменений, вызванных некоторыми факторами. Со-

гласно определению системы признаки системы характеризуют первичные элементы, отношения между ними и законы композиции, ограничивающие отношения. Таким образом, перечисленные признаки должны быть отражены в модифицируемой булевой сети.

Перечень необходимых изменений:

1. Так как первичными элементами NK -автомата являются вершины сети, которые обладают свойством находиться всего лишь в двух состояниях (активная, пассивная вершина), необходимо ввести дополнительные характеристики, способные изменяться или оставаться без изменения в процессе функционирования NK -автомата (например, ввести дополнительные типы вершин и им соответствующие свойства), а также расширить понятие состояния NK -автомата.

2. Отношения между первичными элементами NK -автомата определяются дугами, связывающими вершины. Для изменения этих признаков необходимо ввести операции по изменению структуры NK -автомата, например, операции удаления, добавления дуг, вершин, объединения нескольких NK -автоматов и т.д.

3. Изменения 1 и 2 приводят к изменениям законов композиции: необходимо ввести ограничения на связи с помощью дуг между различными типами вершин, например, рассматривать дуги нескольких типов; дать возможность изменения значений N и K в процессе функционирования NK -автомата.

4. Так как мы рассматриваем динамические системы, необходимо ввести аналог времени и последствия его изменения.

Выше были приведены самые общие дополнительные свойства и ограничения, которые могут ускорить или замедлить наступление аналога хаоса в рассматриваемой булевой сети. Необходимо понимать, что реализация всех приведенных изменений может привести к тому, что модифицируемый NK -автомат потеряет свои самые ценные качества: простоту и прозрачность функционирования. Дополнение к свойствам и ограничениям зависит от конкретных исследований, в которых будет использоваться булева сеть.

Приведем результаты работы с модифицированным NK -автоматом.

NK -автомат был модифицирован следующим образом. Каждой вершине соответствовала одна из двух булевых функций: AND или OR . Функция AND допускала активность вершины только в случае активности всех входных вершин. Для активности вершины с функцией OR было достаточно иметь хотя бы одну активную входную вершину. Такое свойство моделировало свойства устойчивости вершины к изменениям активности. Вершина с функцией AND устойчива, а с функцией OR – неустойчива. Так как для каждой вершины имеется 2^K возможных вариантов распределения активности среди входных вершин, выбор из всего лишь двух функций, с одной стороны, обеднял возможности NK -автомата, а с другой – упрощал работу с ним.

Так как свойства вершин первичных элементов системы могут изменяться со временем, была задействована возможность изменения их после каждого такта работы NK -автомата. Был введен процент изменения булевых функций для каждого нового состояния NK -автомата – U_b . Каждому состоянию сети $Y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ соответствовало только одно распределение булевых функций среди вершин. Состояние модифицированного NK -автомата

после каждого такта определялось как $Y_M^t = (Y^t, B^t)$, где $B = (b_1, b_2, \dots, b_N)$, где b_i – функции *AND* или *OR*:

$$Y_M^t = (r_1^t, r_2^t, \dots, r_N^t, b_1^t, b_2^t, \dots, b_N^t). \quad (4)$$

Работа *NK*-автомата завершалась после наступления цикла, т.е. когда находились два состояния $Y_M^t, Y_M^T, t \neq T$, для которых выполнялось условие

$$Y_M^t = Y_M^T. \quad (5)$$

Выполнения условия (5) было достаточно для наступления цикла, так как в этом случае, начиная с Y_M^T , происходит повторение состояний:

$$Y_M^{t+1} = Y_M^{T+1}, Y_M^{t+2} = Y_M^{T+2}, Y_M^{t+3} = Y_M^{T+3}, \dots \quad (6)$$

После завершения работы *NK*-автомата могло происходить повторение его работы в зависимости от заданного числа повторений U_r .

Для анализа условия (5) был введен процент совпадения состояний U_{NK} , где $U_{NK} \leq 100$. Состояния считались совпавшими, если для любых $N \times U_{NK} / 100$ вершин совпадали значения активности и булевы функции, т.е. в (4) вместо N бралось $Z = N \times U_{NK} / 100$, $Y_M' = (r_1, r_2, \dots, r_Z, b_1, b_2, \dots, b_Z)$. По-

нятно, что в этом случае длина цикла уменьшалась, так как при совпадении состояний Y_M^t, Y_M^T состояния Y_M^t, Y_M^T могли не совпадать, потому что $Z \leq N$.

В процессе работы *NK*-автомата разрешалось принудительное незначительное изменение активности вершин. Процент изменения – U_a .

Модифицированный *NK*-автомат создавался следующим образом. Перед началом работы *NK*-автомата фиксировались значения N и K . Вероятностным образом среди вершин распределялись булевы функции и активность вершин, задавались связи между вершинами (дуги). Запрещались изолированные вершины и вершины, замкнутые на себя петлей, т.е. имеющие дуги, одновременно являющиеся для вершины входными и выходными. Определялись процент совпадения активности вершин для определения совпадения состояний сети (U_{NK}), количество повторений работы *NK*-автомата (U_r), выяснялось, необходимо ли принудительное изменение активности вершин и булевых функций после каждого такта работы *NK*-автомата: если да, то проценты этих изменений (U_a, U_b). Кроме того, задавались требования к необходимости перед началом каждого повторения работы *NK*-автомата нового задания: активности вершин, распределения булевых функций, связей между вершинами.

Таким образом, основными изменениями в экспериментах с модифицированным *NK*-автоматом являлись изменение распределения булевых функций после каждого такта работы *NK*-автомата, новое понимание состояния *NK*-автомата Y_M . Это соответствует пункту 1 в перечне изменений для модифицируемого *NK*-автомата, представленном ранее.

Проводились эксперименты с модифицированными *NK*-автоматами, состоящими из 10, 30, 50, 75 и 100 вершин, при значении K от 2 до 5. Рас-

сматривался ансамбль из 3500 NK -автоматов, т.е. $U_r = 3500$ при новом задании активности вершин, распределении булевых функций, связей между вершинами перед началом каждого повторения.

В табл. 1 в качестве примера приведены результаты для ансамбля из 3500 NK -автоматов при $N = 30$, $U_a = 0$, $U_b = 100$.

Таблица 1

Результаты работы NK -автоматов

Число входных дуг K	Процент совпадений U_{NK}	Длина среднего цикла	Мода циклов	Максимальная длина цикла
2	100	2,91	22,08	411
2	95	6,87	14,22	248
3	100	2503,89	2854,30	53561
4	95	932,10	381,78	4759
5	95	937,61	407,75	5241

Резкое изменение в длине цикла происходило при $K = 3$. Для NK -автомата с $N = 30$ наблюдалось неожиданное уменьшение длин среднего цикла для $K > 3$, но в других экспериментах для $N > 30$ наблюдалось не уменьшение, а стабилизация этого свойства. Тем не менее даже при $N = 30$ величина среднего цикла при $K = 4$ и $K = 5$ резко увеличивалась по сравнению с $K = 2$. Уменьшение значения U_{NK} до 95 % не изменяло этого свойства модифицированного NK -автомата.

Проведенные эксперименты показали, что основное свойство NK -автомата повторяется для модифицированного NK -автомата. Для NK -автомата начиная с $K = 3$ наблюдается возникновение аналога хаоса – резкое увеличение длины цикла состояний автомата.

Было установлено, что модифицированные NK -автоматы являются аппаратом моделирования особого, близкого к хаосу периода функционирования многоагентных специализированных систем, для которых смена состояний, вызванная деятельностью рациональных интеллектуальных в слабом смысле агентов, может быть представлена в виде ориентированного графа.

Библиографический список

1. **Бабич, М. Ю.** К вопросу интеллектуализации специальных организационно-технических систем / М. Ю. Бабич // Вопросы радиоэлектроники. – 2017. – № 12. – С. 6–12.
2. **Рассел, С.** Искусственный интеллект. Современный подход / С. Рассел, П. Норвиг. – М. : Вильямс, 2006. – 1048 с.
3. **Городецкий, В. И.** Многоагентные системы (обзор) / В. И. Городецкий, М. С. Грушинский, А. В. Хабалов // Новости искусственного интеллекта. – 1998. – № 2. – С. 64–116.
4. **Тарасов, В. Б.** От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика / В. Б. Тарасов. – М. : УРСС, 2002. – 352 с.
5. **Михеенкова, М. А.** Об одном подходе к распознаванию рациональности в коллективах агентов / М. А. Михеенкова, В. К. Финн // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2010. – № 2. – С. 22–32.

6. Википедия. Интеллектуальный агент. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/интеллектуальный_агент (дата обращения: 01.02.2018).
7. Имитационная модель обнаружения нарушителей границы охраняемой области / М. Ю. Бабич, В. С. Ковалева, Е. Э. Нисенбаум, Н. В. Ползунов, С. А. Рыбин // Вопросы радиоэлектроники. – 2008. – № 5. – С. 112–120.
8. **Виноградов, Г. П.** Моделирование поведения агента с учетом субъективных представлений о ситуации выбора / Г. П. Виноградов, В. Н. Кузнецов // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2011. – № 3. – С. 58–72.
9. **Капица, С. П.** Синергетика и прогнозы будущего / С. П. Капица, С. П. Курдюмов, Г. Г. Малинецкий. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 288 с.
10. **Князева, Е. Н.** Основания синергетики. Синергетическое мировоззрение / Е. Н. Князева, С. П. Курдюмов. – М. : Либерком, 2014. – 256 с.
11. **Хакен, Г.** Синергетика / Г. Хакен. – М. : Мир, 1979. – 388 с.
12. **Малинецкий, Г. Г.** Математические основы синергетики: хаос, структуры, вычислительный эксперимент / Г. Г. Малинецкий. – М. : Либерком, 2015. – 310 с.
13. **Чернавский, Д. С.** Синергетика и информация: динамическая теория информации / Д. С. Чернавский. – М. : Либерком, 2015. – 276 с.
14. **Бабич, М. Ю.** Нерешаемые задачи интеллектуальной поддержки управления многоагентными организационно-техническими системами / М. Ю. Бабич // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Сер.: Технические науки. Информатика, вычислительная техника и управление. – 2017. – № 4 (38). – С. 71–78.
15. **Kauffman, S. A.** The Origin of Order: Self-Organization and Selection in Evolution / S. A. Kauffman. – New York ; Oxford : Oxford University Press, 1993. – 710 p.
16. **Кауфман, С. А.** Антихаос и приспособление / С. А. Кауфман // В мире науки. – 1991. – № 10. – С. 58–65.
17. **Данилова, О. Т.** Аппараты Кауфмана как циклические генераторы заранее заданных команд / О. Т. Данилова, Р. Т. Файзуллин // Математические структуры и моделирование. – 2004. – Вып. 13. – С. 132–134.
18. **Кольчугина, Е. А.** Исследование свойств цифровых организмов с помощью НК-подобных автоматов / Е. А. Кольчугина // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2011. – № 11. – С. 20–24.
19. **Урманцев, Ю. А.** Общая теория систем: состояние, приложения и перспективы развития / Ю. А. Урманцев // Система. Симметрия. Гармония. – М. : Мысль, 1988. – С. 38–124.
20. **Артюхов, В. В.** Общая теория систем: самоорганизация, устойчивость, разнообразие, кризисы / В. В. Артюхов. – М. : Либерком, 2009. – 224 с.

References

1. Babich M. Yu. *Voprosy radioelektroniki* [Issues of radio electronics]. 2017, no. 12, pp. 6–12.
2. Rassel S., Norvig P. *Iskusstvennyy intellekt. Sovremennyy podkhod* [Artificial intelligence. A modern approach]. Moscow: Vil'yams, 2006, 1048 p.
3. Gorodetskiy V. I., Grushinskiy M. S., Khabalov A. V. *Novosti iskusstvennogo intellekta* [Artificial intelligence news]. 1998, no. 2, pp. 64–116.
4. Tarasov V. B. *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nyim organizatsiyam: filosofiya, psikhologiya, informatika* [From multi-agent systems to intelligent organizations: philosophy, psychology, informatics]. Moscow: URSS, 2002, 352 p.
5. Mikheenkova M. A., Finn V. K. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial intelligence and decision making]. 2010, no. 2, pp. 22–32.
6. *Vikipediya. Intellektual'nyy agent* [Wikipedia. Artificial intelligence]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/интеллектуальный_агент (accessed Febr. 01, 2018).

7. Babich M. Yu., Kovaleva V. S., Nisenbaum E. E., Polzunov N. V., Rybin S. A. *Vo-prosy radioelektroniki* [Issues of radio electronics]. 2008, no. 5, pp. 112–120.
8. Vinogradov G. P., Kuznetsov V. N. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial intelligence and decision making]. 2011, no. 3, pp. 58–72.
9. Kapitsa S. P., Kurdyumov S. P., Malinetskiy G. G. *Sinergetika i prognozy budushchego* [Synergy and forecasting of future]. Moscow: Editorial URSS, 2003, 288 p.
10. Knyazeva E. N., Kurdyumov S. P. *Osnovaniya sinergetiki. Sinergeticheskoe mirovozzrenie* [Foundations of synergy. Synergetic world outlook]. Moscow: Liberkom, 2014, 256 p.
11. Khaken G. *Sinergetika* [Synergy]. Moscow: Mir, 1979, 388 p.
12. Malinetskiy G. G. *Matematicheskie osnovy sinergetiki: khaos, struktury, vychislitel'nyy eksperiment* [Mathematical foundations of synergy: chaos, structures, computational experiment]. Moscow: Liberkom, 2015, 310 p.
13. Chernavskiy D. S. *Sinergetika i informatsiya: dinamicheskaya teoriya informatsii* [Synergy and information: the dynamic theory of information]. Moscow: Liberkom, 2015, 276 p.
14. Babich M. Yu. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plus. Ser.: Tekhnicheskie nauki. Informatika, vychislitel'naya tekhnika i upravlenie* [The XXI century: results of the past and problems of the future plus. Series: Engineering sciences. Informatics, computing technology and control]. 2017, no. 4 (38), pp. 71–78.
15. Kauffman S. A. *The Origin of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. New York; Oxford: Oxford University Press, 1993, 710 p.
16. Kaufman S. A. *V mire nauki* []. 1991, no. 10, pp. 58–65.
17. Danilova O. T., Fayzullin R. T. *Matematicheskie struktury i modelirovanie* [Mathematical structures and simulation]. 2004, iss. 13, pp. 132–134.
18. Kol'chugina E. A. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of computer and information technologies]. 2011, no. 11, pp. 20–24.
19. Urmantsev Yu. A. *Sistema. Simmetriya. Garmoniya* [System. Symmetry. Harmony]. Moscow: Mysl', 1988, pp. 38–124.
20. Artyukhov V. V. *Obshchaya teoriya sistem: samoorganizatsiya, ustoychivost', raznobrazie, krizisy* [General theory of systems: self-organization, stability, diversity, crises]. Moscow: Liberkom, 2009, 224 p.

Бабич Михаил Юрьевич

доктор технических наук, доцент,
главный специалист отделения,
Научно-производственное
предприятие «Рубин» (Россия,
г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: babichmj@mail.ru

Babich Mikhail Yur'evich

Doctor of engineering sciences, associate
professor, department main specialist,
Research and Production Enterprise
«Rubin» (2 Baydukova street,
Penza, Russia)

Бабич Андрей Михайлович

кандидат технических наук, инженер-
программист, Научно-производственное
предприятие «Рубин» (Россия, г. Пенза,
ул. Байдукова, 2)

E-mail: fieryeye@yandex.ru

Babich Andrey Mikhaylovich

Candidate of engineering sciences,
software engineer, Research
and Production Enterprise «Rubin»
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

УДК 05.13.00

Бабич, М. Ю.

Аппарат моделирования особого периода функционирования многоагентных специализированных систем / М. Ю. Бабич, А. М. Бабич // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 4 (48). – С. 17–27. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-4-2.

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕХАНИЗМ ПЕРЕДАЧИ ТРАФИКА ЖЕСТКОГО РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В СЕТИ ETHERNET

Аннотация.

Актуальность и цели. В современных автоматических системах управления большую роль играют передача данных и реакция пользователя на изменение системы. Обмен данными происходит по технологии *Ethernet*. Однако технология *Ethernet* не позволяет обрабатывать трафик реального времени с минимальной задержкой, для этих целей предусмотрена технология *Time-Triggered Ethernet (TTE)*. Технология *TTE* обеспечивает передачу трафика реального времени с точностью до микросекунды. Объект исследования – передача *Ethernet*-сообщений с поддержкой технологии *TTE*. Предмет исследования – задержка кадров при передаче сообщений по сети. Цель исследования – разработка нового способа передачи *Ethernet*-сообщений в распределенной системе жесткого реального времени, который упростит подключение пользовательской аппаратуры, уменьшит задержку кадров в сети и исключит временные конфликты между *Ethernet*-сообщениями различного класса.

Материалы и методы. Исследования передачи стандартных кадров (эластичный трафик) и кадров реального времени (трафик реального времени) проведены по технологии *TTE*.

Результаты. Разработан новый способ передачи *Ethernet*-сообщений в распределенной системе жесткого реального времени, который позволяет уменьшить задержку кадров в сети, повысить пропускную способность сети, исключить временные конфликты между *TT*- и *ET*-кадрами, упростить подключение пользовательской аппаратуры за счет исключения защитника системы на выходные порты коммутатора, непосредственно обеспечивающего доставку кадров по адресатам назначения.

Выводы. Разработанный новый способ по технологии *TTE* повышает быстродействие при передаче сообщений в автоматических системах управления, позволяет исследователям и разработчикам телекоммуникационного оборудования спроектировать новую систему по передаче данных с использованием технологии *TTE*.

Ключевые слова: Time-Triggered Ethernet, трафик реального времени, задержка кадра, планировщик расписания, сеть Петри.

К. И. Nikishin, N. N. Konnov, E. I. Gurin

AN IMPROVED MECHANISM OF TRANSMISSION OF HARD REAL-TIME TRAFFIC IN THE ETHERNET

Abstract.

Background. Data transmission and user response to the system change play a big role in the modern automatic control systems (ACS). Data exchange takes place

© Никишин К. И., Коннов Н. Н., Гурин Е. И., 2018. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

over the Ethernet technology. However, the Ethernet technology does not allow to process real-time traffic with minimal delay, for this purpose the Time-Triggered Ethernet is provided. The Time-Triggered Ethernet (TTE) is used for transmission of real-time traffic with microsecond accuracy. The object of research is the transmission of Ethernet messages with support of TTE technology. The subject of the research is frame delay in the transmission of messages over the network. The purpose of the research is development of a new method of transmission of Ethernet messages in a distributed hard real-time system, which will simplify the connection of user hardware, reduce the frame delay in the network and exclude time conflicts between the Ethernet messages of different class.

Materials and methods. Research of transmission of standard frames (elastic traffic) and real-time frames (real-time traffic) by TTE technology.

Results. The new method of transmission of Ethernet messages in a distributed hard real-time system is developed, which allows to reduce the delay of frames in the network, increase the network bandwidth, exclude time conflicts between TT- and ET-frames, simplify the connection of user hardware by excluding the system guardian on the output ports of the switch, directly providing transfer of frames to the destination.

Conclusions. The new developed method of TTE technology will improve the performance in the transmission of messages to the ACS, will allow researchers and developers of telecommunications equipment to design a new system for data transfer using TTE technology.

Keywords: Time-Triggered Ethernet, real-time traffic, frame delay, scheduler, Petri nets.

Введение

На сегодня самой распространенной сетевой технологией по передаче данных является технология *Ethernet*. Существует много вариаций стандарта *Ethernet*, в том числе с поддержкой качества обслуживания (*Quality of Service*). Технология *Ethernet* не позволяет обрабатывать трафик реального времени с минимальной задержкой, что приводит к появлению большого разброса джиттера.

Для передачи сообщений трафика реального времени с точностью до микросекунды в распределенной системе жесткого реального времени используется технология *Time-Triggered Ethernet (TTE)*, которая основывается на парадигме коммуникации срабатывания по времени [1–2]. Технология *TTE* применяется в таких автоматических системах управления (АСУ), где задержка передачи данных по сети критична: в авиационной, аэрокосмической, железнодорожной, транспортной, автомобильной, военной и промышленной сферах.

В статье предлагается усовершенствованный способ передачи *Ethernet*-сообщений в распределенной системе жесткого реального времени по технологии *TTE – Schedule Time-Triggered Ethernet (STTE)*. Механизм *STTE* позволяет упростить подключение пользовательской аппаратуры, уменьшить задержку кадров в сети и исключить временные конфликты между *Ethernet*-сообщениями различного класса.

1. Особенности *Time-Triggered Ethernet*

Стандарт *TTE* [3] разделяет все передаваемые сообщения на два вида:

- сообщения, которые срабатывают по времени (*TT*-кадр);
- сообщения, которые срабатывают по событию (*ET*-кадр).

Таким образом, технология *TTE* работает с двумя видами трафика: трафик реального времени, который передает *TT*-сообщения, и стандартный (эластичный) трафик, который передает кадры стандартной технологии *Ethernet*, при этом обеспечивается преемственность со стандартом *IEEE 802.3* [4].

TT-кадры жестко синхронизированы по времени через глобальное время системы и обрабатываются с минимальной или заданной задержкой. *TT*-кадр определяется системой по идентификатору в сообщении.

ET-кадры относятся к эластичному трафику и не имеют жестких ограничений по времени доставки. *ET*-кадры передаются как обычные кадры технологии *Ethernet*.

Технология *TTE* основывается на понятиях «слот», «раунд», «цикл». Для каждого кадра реального времени создается свой виртуальный таймслот, который координируется через *TDMA*-раунды, реализующие режим множественного доступа с временным разделением (*TDMA*) для *TT*-кадров (рис. 1).

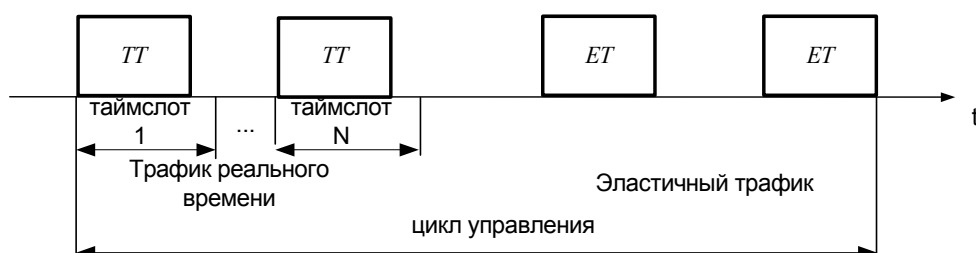


Рис. 1. Расположение *Ethernet*-сообщений по таймслотам в цикле управления

Задержка *TT*-кадра передается в формате кадра, она контролируется аппаратным защитником системы [5].

Недостатками технологии *TTE* являются:

- аппаратные средства на сбор, вычисление, хранение константной задержки в формате *TT*-кадра, а также затраты на подключение пользовательской аппаратуры через специальное устройство «защитник системы»;
- прерывание *ET*-кадра в случае временного конфликта между *ET*-и *TT*-кадрами в коммутаторе, что приводит к уменьшению пропускной способности сети из-за повторной передачи прерванного *ET*-кадра. Появляется дополнительная нагрузка вычислительных средств на передатчик по контролю за временем отправления;
- отсутствие возможности передачи нескольких кадров, направленных к разным портам, в одном таймслоте.

2. Усовершенствование технологии *Time-Triggered Ethernet*

Устранение отмеченных выше недостатков классической технологии *TTE* обеспечивается предлагаемым авторами алгоритмом *STTE*, укрупненная схема работы которого представлена на рис. 2. Основная идея алгоритма *STTE* заключается в реализации функций по обеспечению доставки *TT*-кадров абоненту согласно заранее установленному расписанию не защитником системы, реализующим селекцию кадров на входе коммутатора, а непосредственно коммутатором *Ethernet* на его выходном порту.

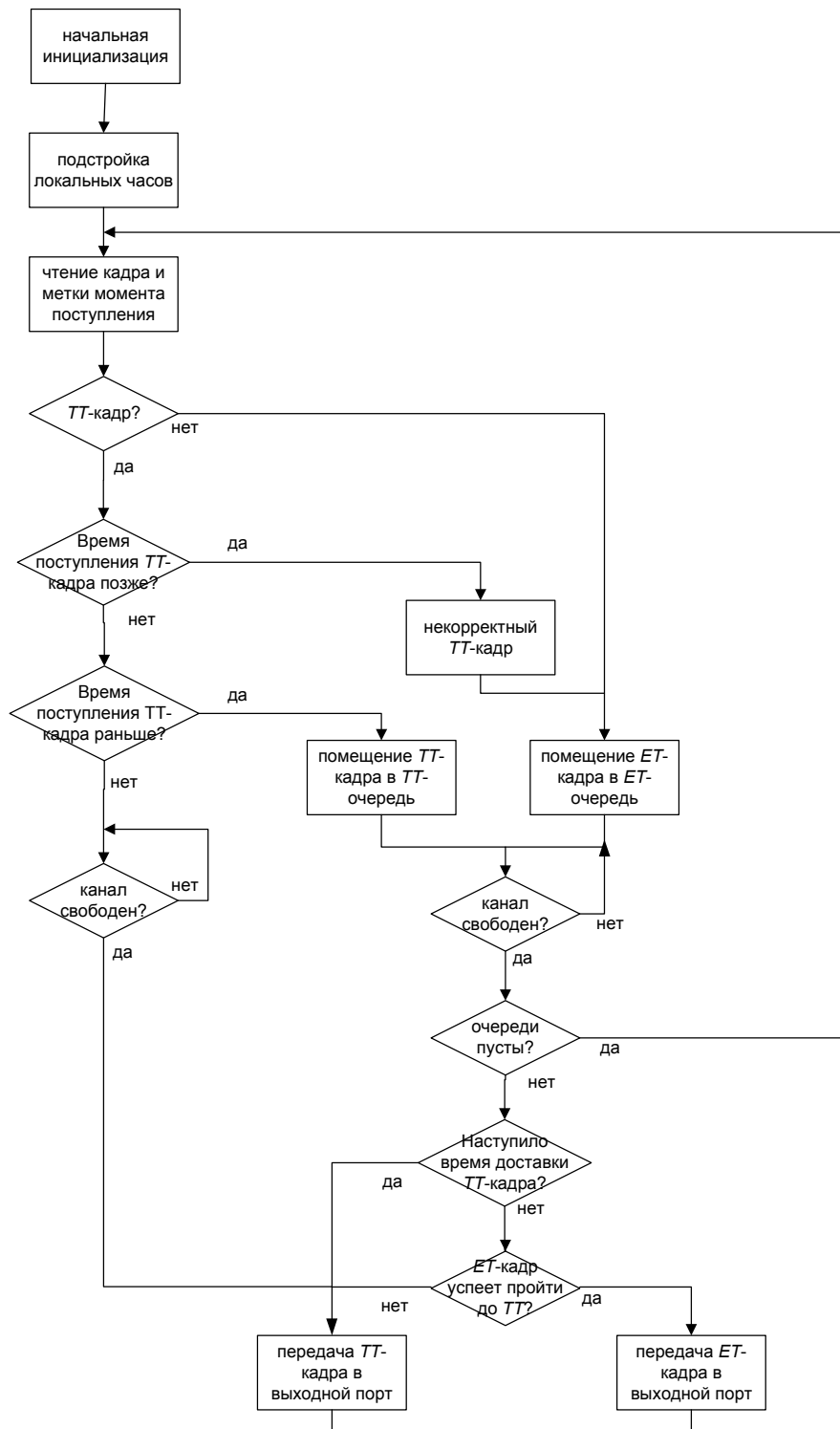


Рис. 2. Алгоритм работы STTE

При запуске системы выполняется конфигурирование, заключающееся в задании планировщика расписаний каждому сетевому узлу и задании пара-

метров подстройки временных окон приема TT -кадров, установки тайм-слотов в циклическом алгоритме управления. Коммутатор выполняет рассылку широковещательного TT -кадра, содержащего значение локального времени, по которому происходят подстройка локальных часов сетевых узлов и их синхронизация.

Принятый коммутатором кадр продвигается в планировщик расписания, где классифицируется по типу трафика (ET - или TT -кадр). После этого фиксируется момент поступления каждого TT -кадра, значение которого сравнивается с установленным значением момента его доставки расписанием. Если момент прибытия кадра позже заранее известного времени, зависящего от времени доставки, то TT -кадр помечается как некорректный.

Для каждого выходного порта коммутатора контролируется время доставки поступивших в него TT -кадров, где:

- если текущий момент поступления TT -кадра равен значению времени доставки в расписании, то выполняется передача принятого TT -кадра на выходной канал, даже если его буферизация не закончена;
- если текущий момент поступления TT -кадра меньше значения времени доставки в расписании, то TT -кадр помещается в специальный отдельный буфер (очередь).

ET -кадры классифицируются по классу качества обслуживания и записываются в отдельные очереди соответствующих классов, при этом снабжаются метками, указывающими на размер кадра. Таймер проверяет наступление момента доставки очередного TT -кадра, и если время доставки TT -кадра не наступило, таймер передает управление диспетчеру очередей.

Диспетчер запускается при появлении непустых очередей и освобождении выходного канала и проверяет возможность передачи ET -кадра до того, как наступит момент доставки очередного TT -кадра:

$$T_{\text{тек}} + T_{\text{ET}} \leq T_{\text{бл}} + T_{\text{TT}},$$

где $T_{\text{тек}}$ – текущее время в системе; T_{ET} – время передачи ET -кадра с учетом его длины; $T_{\text{бл}}$ – время блокировки; T_{TT} – время передачи TT -кадра.

Таким образом, возможность передачи ET -кадра определяется исходя из условия, что текущий момент времени системы и длина ET -кадра должны быть меньше наступления момента доставки очередного TT -кадра:

- запускается передача ET -кадра из выбранной очереди в выходной канал;
- иначе ожидается момент доставки очередного TT -кадра, и когда он наступает, осуществляется передача очередного TT -кадра из выбранной очереди в выходной канал.

Затем обработка снова переходит к планировщику расписания, где он заново продвигает следующий кадр в коммутатор.

Функционирование устройства, реализующего механизм $STTE$, структурная схема которого показана на рис. 3, заключается в следующем:

1. По шине приема поступают кадры из аппаратуры продвижения кадров в порт назначения коммутатора, направленные в данный порт.
2. Текущий момент поступления TT -кадра сравнивается с моментом доставки в планировщике расписания. Планировщик расписания представля-

ет собой память (набор регистров), в которой хранятся значения моментов доставки *ТТ*-кадров.

3. Таймер проверяет момент доставки *ТТ*-кадров. Планировщик расписания может либо передавать *ЕТ*-кадр или некорректный *ТТ*-кадр в классифицирующее устройство (классификатор), либо помещать *ТТ*-кадр в очередь *ТТ*-кадров (текущий момент *ТТ*-кадра меньше момента его доставки), либо передавать *ТТ*-кадр сразу же в выходной канал (текущий момент *ТТ*-кадра равен моменту его доставки).

4. Классификатор классифицирует *ЕТ*-кадры в зависимости от типа трафика и помещает в очередь *ЕТ*-кадров.

5. Кадры записываются по шине записи, а считываются из очередей по шине чтения. Таймер постоянно проверяет наступление момента доставки *ТТ*-кадра и передает управление диспетчеру очередей.

6. Диспетчер запускается сигналами: сигнал «очереди не пусты» и сигнал «выходной канал свободен». Осуществляется передача кадров в выходной канал.

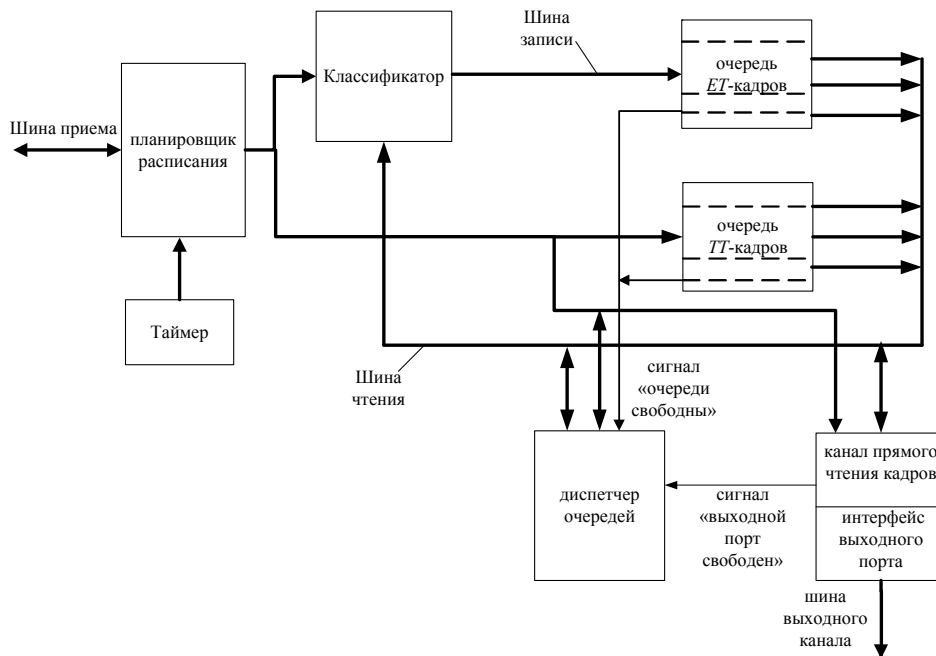


Рис. 3. Структура устройства, реализующего механизм *STTE*

Отличительными особенностями механизма *STTE* являются:

- коммутатор обеспечивает доставку *ТТ*-кадров получателю в заранее назначенные моменты времени по расписанию, устанавливаемому заранее для каждого выходного порта коммутатора специальными конфигурационными кадрами, при этом моменты времени доставки кадров и расписания устанавливаются относительно начала цикла управления;
- принятый коммутатором кадр продвигается в выходной порт назначения, где классифицируется по типу трафика, кадры *ЕТ*- и *ТТ*-трафика помещаются в отдельные специальные буфера, при этом фиксируется момент поступления каждого *ТТ*-кадра, значение которого сравнивается с установ-

ленным значением момента его доставки расписанием, и в случае прибытия кадра позже заранее известного времени, зависящего от времени доставки, он помечается как некорректный;

- для каждого выходного порта коммутатора контролируется время доставки поступивших в него *ТТ*-кадров и при достижении локального времени специального окна, определяемого соответствующим расписанием, выполняется передача буферизируемого *ТТ*-кадра, даже если его буферизация не закончена;

- для каждого момента доставки *ТТ*-кадров, указанных в расписании, вычисляется время блокировки начала передачи *ЕТ*-кадров, величина которого определяется максимальной длиной *ЕТ*-кадра, при этом очередная блокировка снимается после передачи очередного корректного *ТТ*-кадра, в случае некорректного *ТТ*-кадра блокировка снимается при окончании специального окна или отсутствии поступления очередного *ТТ*-кадра;

- передача *ЕТ*-кадра из соответствующего буфера выходного порта коммутатора разрешается после передачи каждого *ТТ*-кадра при условии отсутствия блокировки;

- коммутатор выполняет рассылку широковещательного *ТТ*-кадра, содержащего значение локального времени, по которому происходят подстройка локальных часов сетевых узлов и их синхронизация;

- некорректные *ТТ*-кадры передаются как *ЕТ*-кадры.

Работу механизма *STTE* иллюстрируют временные диаграммы, показанные на рис. 4.

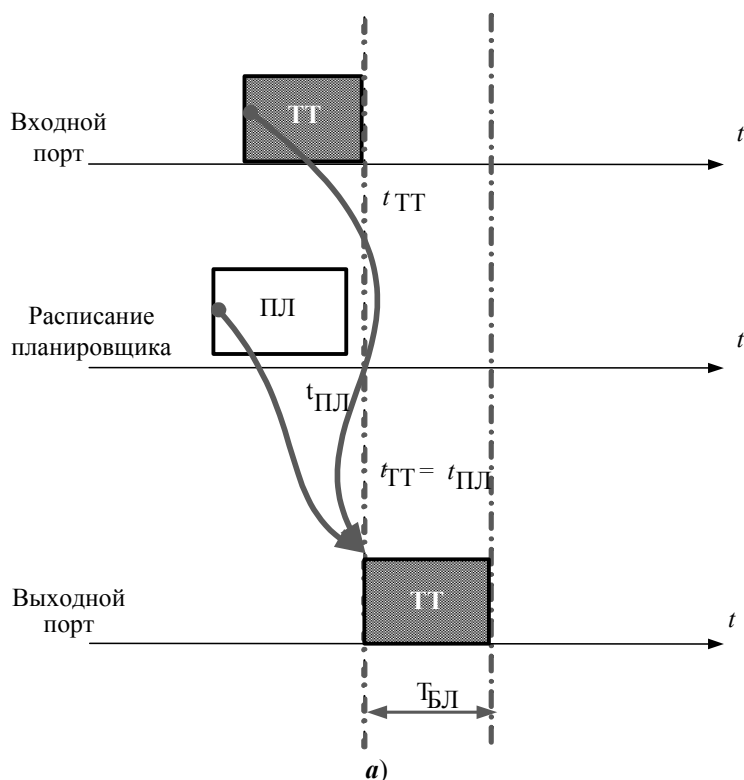


Рис. 4. Временные диаграммы работы механизма *STTE*

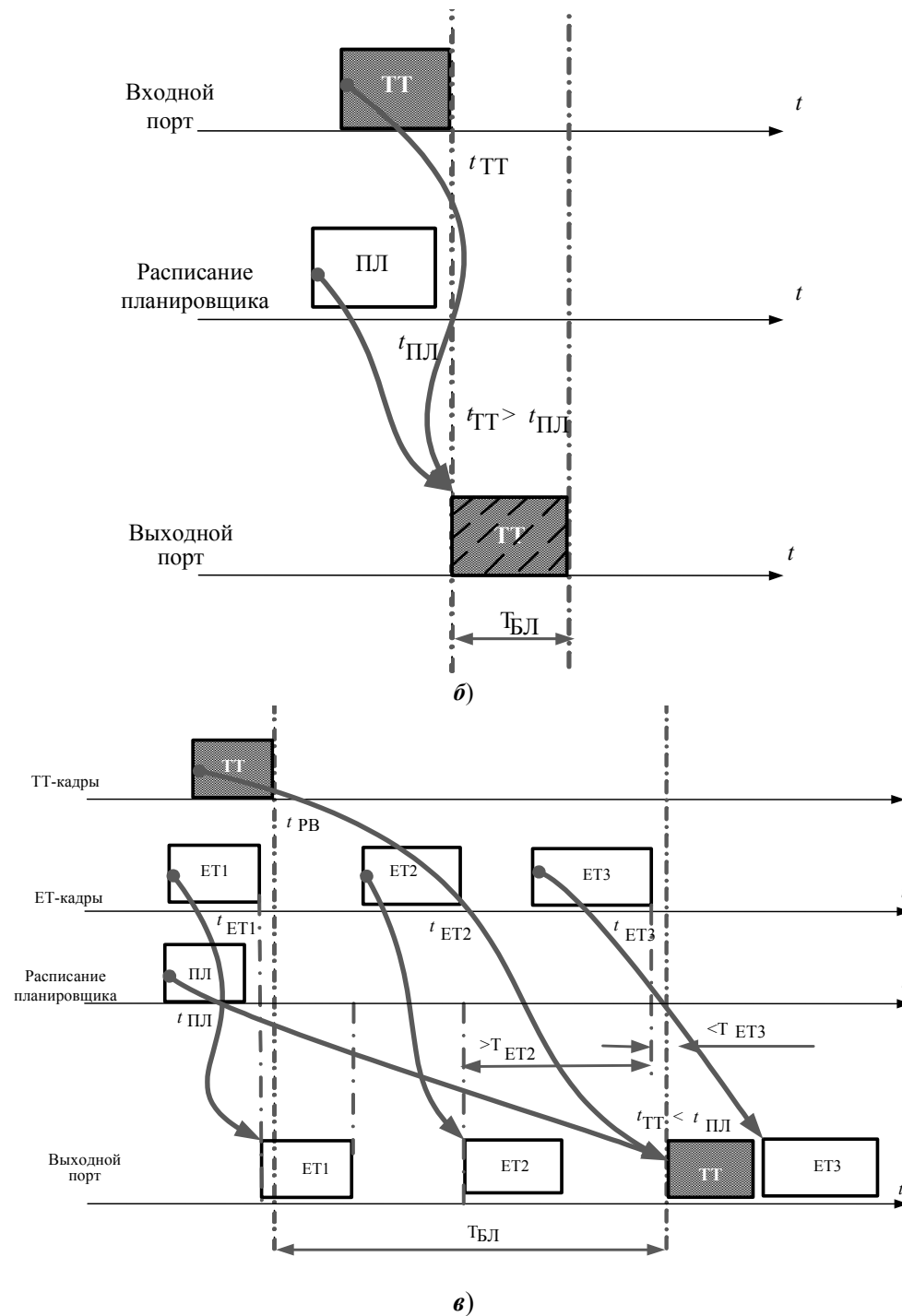


Рис. 4. Окончание

Текущий момент поступления TT -кадра сравнивается с моментом доставки данного TT -кадра в расписании планировщика (ПЛ), и:

- если оба момента равны ($t_{TT} = t_{ПЛ}$), то TT -кадр передается сразу же в выходной канал (рис. 4,а);

- если момент поступления TT -кадра больше момента доставки в расписании ($t_{TT} > t_{ПЛ}$), то TT -кадр помечается как некорректный и передается как ET -кадр (рис. 4,б);

- если момент поступления TT -кадра меньше момента доставки в расписании ($t_{TT} < t_{ПЛ}$), то проверяется возможность передачи ET -кадра: текущий момент времени системы и длина ET -кадра должны быть меньше наступления момента доставки TT -кадра ($t_{БЛ} > t_{ET2}$), тогда осуществляется передача ET -кадра, иначе когда ($t_{БЛ} < t_{ET3}$), ET -кадр передается только после передачи TT -кадра (рис. 4,в).

Алгоритмы были верифицированы [6–8] путем их имитационного моделирования с использованием математического аппарата иерархических временных цветных сетей Петри [9] с помощью свободно распространяемого пакета *CPN Tools*. Пакет *CPN Tools* позволит оценить задержку кадров [10] при передаче данных по сети.

Заключение

Предложенный механизм *STTE* позволяет уменьшить задержку кадров в сети, повысить пропускную способность сети, исключить временные конфликты между TT - и ET -кадрами, упростить подключение пользовательской аппаратуры за счет исключения защитника системы на выходные порты коммутатора, непосредственно обеспечивающего доставку кадров по адресатам назначения.

Предложена структура устройства, реализующего механизм *STTE*, детально представлены все основные узлы системы. Структурная реализация позволит разработчикам телекоммуникационного оборудования спроектировать систему с предложенным механизмом *STTE*.

Разработанный механизм *STTE* будет полезен исследователям как при разработке аппаратуры *TTE* (разработка новых алгоритмов диспетчеризации очередей в коммутаторе, улучшение и повышение параметров быстродействия работы системы), так и для анализа исследования динамики работы конкретных реализаций автоматических систем управления, использующих технологию *TTE*.

Библиографический список

1. Time-Triggered Communication / ed. by R. Obermaisser. – San Francisco, California, USA : CRC Press, 2012. – P. 575.
2. **Kopetz, H.** The time-triggered Ethernet (tte) design / H. Kopetz, A. Ademaj, P. Grillinger, K. Steinhammer // Eighth IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC'05) (May 18, 2005 to May 20, 2005). – Seattle, Washington, 2005. – P. 22–33.
3. SAE Standard AS 6802: Time-Triggered Ethernet. Описание стандарта IEEE 802.1q. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.1Q (дата обращения: 15.02.2018).
4. **Никишин, К. И.** Разработка защитника системы Time-Triggered Ethernet / К. И. Никишин // Новые информационные технологии и системы (НИТиС-2016) : сб. науч. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – С. 176–179.
5. **Nikishin, K.** Modelling of systems using Time-Triggered Ethernet / K. Nikishin, N. Konnov, D. Pashchenko // Information Technologies and Mathematical Modelling. – 2016. – Vol. 638. – P. 303–314.

6. **Nikishin, K.** Implementation of Time-Triggered Ethernet using colored Petri net / K. Nikishin, N. Konnov, D. Pashchenko // IEEE Xplore (ICIEAM). – URL://http://ieeexplore.ieee.org/ document/8076387/ (дата обращения : 17.02.2018).
7. **Никишин, К. И.** Моделирование сетями Петри коммуникационного оборудования Time-Triggered Ethernet / К. И. Никишин, Н. Н. Коннов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 2 (22). – С. 222–236.
8. **Jensen, K.** Coloured Petri Nets: modelling and validation of concurrent systems / K. Jensen, L. M. Kristensen. – Berlin Heidelberg : Springer-Verlag 2009. – 2009.
9. **Таранцев, Е. К.** Моделирование цветными сетями Петри процесса регистрации радиолокационной информации / Е. К. Таранцев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 70–78.

References

1. *Time-Triggered Communication*. Ed. by R. Obermaisser. San Francisco, California, USA: CRC Press, 2012, p. 575.
2. Kopetz H., Adema J. A., Grillinger P., Steinhammer K. *Eighth IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC'05) (May 18, 2005 to May 20, 2005)*. Seattle, Washington, 2005, pp. 22–33.
3. *SAE Standard AS 6802: Time-Triggered Ethernet. Description of the standard IEEE 802.1q*. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.1Q (accessed Febr. 15, 2018).
4. Nikishin K. I. *Novye informatsionnye tekhnologii i sistemy (NITiS-2016): sb. nauch. st. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [New information technologies and systems 2016: proceedings of XI International scientific and practical conference]. Penza: Izd-vo PGU, 2016, pp. 176–179.
5. Nikishin K., Konnov N., Pashchenko D. *Information Technologies and Mathematical Modelling*. 2016, vol. 638, pp. 303–314.
6. Nikishin K., Konnov N., Pashchenko D. *IEEE Xplore (ICIEAM)*. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/ document/8076387/> (accessed Febr. 17, 2018).
7. Nikishin K. I., Konnov N. N. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in economy, technology, nature and society]. 2017, no. 2 (22), pp. 222–236.
8. Jensen K., Kristensen L. M. *Coloured Petri Nets: modelling and validation of concurrent systems*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 2009, 2009.
9. Tarantsev E. K. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2011, no. 1 (17), pp. 70–78.

Никишин Кирилл Игоревич

аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: kirillnikmail@mail.ru

Nikishin Kirill Igorevich

Postgraduate student, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Коннов Николай Николаевич

кандидат технических наук, профессор,
кафедра вычислительной техники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: knn@pnzgu.ru

Konnov Nikolay Nikolaevich

Candidate of engineering sciences,
professor, sub-department of computer
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Гурин Евгений Иванович

доктор технических наук, профессор,
кафедра вычислительной техники,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: gurin2@yandex.ru

Gurin Evgeniy Ivanovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of computer engineering,
Penza State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 681.3

Никишин, К. И.

Усовершенствованный механизм передачи трафика жесткого реального времени в сети Ethernet / К. И. Никишин, Н. Н. Коннов, Е. И. Гурин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 4 (48). – С. 28–38. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-4-3.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СЕМАФОРОВ В АРХИТЕКТУРЕ IEC 61499 НА ОСНОВЕ ПРОТОКОЛОВ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ КОНСЕНСУСА В СЕТИ НЕНАДЕЖНЫХ ПРОЦЕССОВ

Аннотация.

Актуальность и цели. Международный стандарт IEC 61499, предназначенный для проектирования распределенных компонентно-базированных систем мониторинга и управления промышленными процессами, не позволяет напрямую строить эти системы со сложными видами синхронизации и взаимодействий, большинство из которых основано на концепции семафора. Целью представленной работы является моделирование, верификация и сравнительный анализ производительности распределенных семафоров на основе протоколов *Paxos* и *Raft*, а также их функционально-блочная реализация на основе стандарта IEC 61499.

Материалы и методы. Для построения распределенных семафоров использовались протоколы *Paxos* и *Raft* для достижения консенсуса в сети ненадежных процессоров. Для их формального описания и моделирования выбраны раскрашенные сети Петри, положенные в основу инструментальной системы моделирования *CPN Tools*. Реализация распределенных семафоров производилась на основе функциональных блоков стандарта IEC 61499 в среде *NxtStudio*.

Результаты. Разработаны сетевые модели алгоритмов выполнения операций открытия и закрытия распределенных семафоров (основанных на алгоритмах *Paxos* и *Raft*), которые реализованы в системе *CPN Tools* и позволяют производить как оценку производительности системы, так и ее верификацию. Проведены имитационные эксперименты с этими сетевыми моделями, дан сравнительный анализ подходов на основе *Paxos* и *Raft* и рекомендации по их использованию. Разработана библиотека функциональных блоков для реализации протоколов достижения консенсуса *Paxos* и *Raft*, а также распределенных семафоров на их основе, позволяющая существенно расширить возможности проектирования распределенных управляющих приложений со сложными видами взаимодействий в архитектуре IEC 61499.

Выводы. Результаты имитационных экспериментов и программная реализация показали работоспособность и корректность функционирования распределенных семафоров на основе алгоритмов для достижения консенсуса. Использование протокола *Raft* является предпочтительным как с точки зрения простоты реализации и масштабируемости, так и надежности.

Ключевые слова: распределенная управляющая система, синхронизация, коммуникационный протокол, *Paxos*, *Raft*, раскрашенные сети Петри, функциональный блок.

V. N. Dubinin, I. A. Bezzateev, A. S. Voynov, I. V. Senokosov

MODELLING AND IMPLEMENTATION OF DISTRIBUTED SEMAPHORES IN THE IEC 61499 ARCHITECTURE ON THE BASIS OF PROTOCOLS FOR SOLVING CONSENSUS IN A NETWORK OF UNRELIABLE PROCESSES

Abstract.

Background. The international standard IEC 61499, intended for the design of distributed component-based industrial process measurement and control systems, does not allow the direct building of ones with complex types of synchronization and interactions, most of which are based on the concept of a semaphore. The purpose of the presented work is modeling, verification and comparative analysis of the performance of distributed semaphores based on the Paxos and Raft protocols, as well as their IEC 61499 function block-based implementation.

Materials and methods. To design distributed semaphores, Paxos and Raft protocols for solving consensus in a network of unreliable processors were used. For their formal description, modeling and simulation, the colored Petri nets and the supporting CPN Tools were chosen. The distributed semaphores were implemented on the basis of IEC 61499 function blocks in the NxtStudio.

Results. 1) Net models of algorithms for performing decrementing/incrementing distributed semaphores based on Paxos and Raft were developed in the CPN Tools allowing to conduct both performance evaluation and verification; 2) simulation experiments were carried out using these net models, comparative analysis of the approaches based on Paxos and Raft, as well as recommendations for their use were given; 3) a library of function blocks for implementation of Paxos and Raft, as well as distributed semaphores based on them were developed, which makes it possible to essentially expand capabilities for design of distributed control applications with complex interactions in the IEC 61499 architecture.

Conclusions. The results of the simulation experiments and software implementation showed the operability and correctness of the functioning of distributed semaphores on the basis of the two protocols for solving consensus. The use of the Raft protocol is preferred both in terms of ease of implementation and scalability, as well as reliability.

Keywords: distributed control system, synchronization, communication protocol, Paxos, Raft, coloured Petri nets, function block.

Введение

Для построения распределенных реконфигурируемых компонентно-базированных систем управления технологическим оборудованием был разработан международный стандарт IEC 61499 [1]. Данный стандарт привлек пристальное внимание исследователей, поскольку предлагал четкий путь перехода от устаревших централизованных систем управления к распределенным системам нового поколения на основе множества контроллеров, взаимодействующих в сети. Основным артефактом проектирования в стандарте является функциональный блок (ФБ), управляемый событиями. Для взаимодействия между ресурсами и устройствами системы в данном стандарте используется механизм передачи сообщений посредством коммуникационных ФБ CLIENT/SERVER и PUBLISH/SUBSCRIBE. Данный механизм является единственным и довольно низкоуровневым, что не позволяет напрямую строить

распределенные системы управления со сложными видами синхронизации и взаимодействий, включая «критические секции», «рандеву», «производитель–потребитель», «читатели–писатели» и т.д., которые во многом основаны на использовании концепции семафора [2].

Семафор – это особый тип разделяемой переменной, которая обрабатывается только двумя неделимыми операциями – P и V (закрытие и открытие семафора). Простой, но в то же время показательный пример использования семафора в управляющих системах – это взаимоисключающая работа нескольких устройств IEC 61499 с общим (разделяемым) технологическим оборудованием, данными или коммуникационной сетью.

Существует семантический разрыв между классической концепцией семафора, ориентированной на общую память, и его реализацией в распределенной системе. В системах с разделяемой общей памятью реализация семафора обычно основывается на машинной команде *Test&Set*. В работе [3] предлагается описание взаимного исключения в виде недетерминированного автомата и его реализация на программируемых логических интегральных схемах. Можно выделить два подхода к реализации семафоров в распределенной системе – централизованный [4, 5] и децентрализованный. В работе [4] была предложена клиент-серверная реализация семафора на уровне приложений для сети рабочих станций, работающих под *Unix*. В работе [5] похожий подход был применен в архитектуре IEC 61499. Однако в данных случаях семафор реализован как сервер, что фактически является централизованным решением, имеющим недостатки, присущие всем централизованным системам – низкую надежность и производительность, плохую масштабируемость. В работе [2] приводится децентрализованное решение, основанное на широковещательной рассылке сообщений. Каждый процесс имеет локальную переменную для представления значения семафора. Синхронность операций над семафором в каждом процессе обеспечивается строгой упорядоченностью запросов (сообщений) от процессов на операцию над семафором по меткам времени. Ограничением метода является предположение о надежной передаче сообщений. В работе [6] рассматривается децентрализованное управление распределенными данными на основе протокола двухфазной блокировки, используемого в распределенных базах данных. На основе данного метода предлагаются синхропримитивы для работы с разделяемыми ресурсами. Недостатком данного метода является длительное выполнение операций над семафорами. Каждая операция по изменению значения семафора требует нескольких фаз, каждая из которых предполагает передачу N сообщений, где N – число узлов в сети. В работе [7] для организации распределенного семафора требуется кластеризация узлов системы в двухуровневую структуру, причем размер кластера зависит от значения семафора. К недостаткам метода можно отнести его сложность и плохую масштабируемость.

В нашей работе мы будем использовать более современный подход на основе применения алгоритмов (протоколов) для решения задач консенсуса в сети ненадежных процессов – *Paxos* [8] и *Raft* [9]. Консенсус – процесс получения согласованного результата группой участников, основная проблема – ненадежная среда передачи и сами процессы. Протоколы данного типа в последнее время стали широко использоваться крупнейшими ИТ-компаниями, например *Google*, *Microsoft* и *Facebook*. Следует особо отметить, что в распределенном сервисе конфигурирования и синхронизации *Apache Zookeeper*

[10] механизм распределенного семафора реализован на основе протокола *Zab*, который близок к протоколу *Paxos*.

Целью представленной работы является моделирование, верификация и сравнительный анализ производительности распределенных семафоров на основе протоколов *Paxos* и *Raft*, а также их функционально-блочная реализация на основе стандарта IEC 61499.

1. Подход к реализации распределенных семафоров на основе протоколов для достижения консенсуса

Протоколы семейства *Paxos* гарантируют три следующих показателя: нетривиальность, консистентность и живучесть. В протоколе *Paxos* узлы распределенной системы имеют следующие роли: *Client*, *Proposer*, *Acceptor*, *Learner* [8]. Протокол *Raft* разрабатывался с учетом недостатков предыдущего протокола *Paxos*. При выборе ключевых идей предпочтение отдавалось более простым и практичным решениям. Тем не менее, несмотря на относительную простоту, *Raft* обеспечивает безопасную и эффективную реализацию машины состояний поверх кластерной вычислительной системы. К особенностям *Raft* относятся:

- 1) четкое разделение фаз;
- 2) наличие явно выделенного лидера;
- 3) возможность динамического изменения размера кластера [9].

Ниже предлагается подход к реализации распределенных семафоров на основе протоколов *Paxos* и *Raft*. При разработке распределенного семафора основная задача заключается в обеспечении идентичного состояния семафора на всех узлах распределенной системы. При использовании протокола *Paxos* считаем, что задача, решаемая его компонентами, состоит в определении текущего состояния семафора (после запроса на его изменение), которое должно быть идентично для всех узлов сети, на которых располагаются компоненты *Paxos*, запоминающие принятое решение. В классическом *Paxos* принятое решение запоминает только компонент *Learner*. Для реализации распределенного семафора на основе *Paxos* предлагается запоминать принятое решение также в компоненте *Proposer*. Такой подход позволяет снизить время принятия решения распределенной системы по запросам, которые не могут быть выполнены (например, запрос на захват семафора, который уже занят другим пользователем). Компонент *Proposer*, зная текущее состояние семафора, может сразу проанализировать возможность выполнения полученного запроса. Если был получен запрос на захват семафора, а он уже занят другим пользователем, то компонент *Proposer* сразу отправляет отрицательный ответ на полученный запрос, не задействуя компоненты *Acceptor* и *Learner*, тем самым уменьшая время ответа на такие запросы.

Протокол *Raft* изначально учитывает в себе вышеперечисленные проблемы, возникающие на пути использования протокола *Paxos*. Компоненты *Raft* объединяют в себе упрощенный функционал компонентов *Paxos*, сосредотачиваясь на задачах репликации данных (состояния семафора) в распределенной системе и действиях при выходе из строя компонентов лидера (в *Paxos* был *Proposer*) и ведомых компонентов. При реализации распределенного семафора с помощью протокола *Raft* в качестве данных, подлежащих репликации на все необходимые компоненты распределенной системы, выступают данные о состоянии семафора. Решение о состоянии семафора будет

принимать только компонент-лидер, на остальные компоненты принятое решение (текущее состояние семафора) будет реплицироваться. Компоненты, ведомые лидером, содержат в себе также функционал компонента-лидера, чтобы в случае аппаратного отказа лидера, занять его место. В каждом компоненте необходим функционал, реализующий опрос компонента-лидера ведомыми компонентами при отсутствии запросов в течение заданного времени (по таймеру).

2. Моделирование распределенных семафоров с использованием временных раскрашенных сетей Петри

Наиболее подходящим методом исследования сложных параллельных систем является имитационное моделирование. В рамках этого метода с точки зрения формализации наиболее подходящими являются модели на основе сетей Петри, позволяющие описывать параллельные процессы со сложными видами взаимодействий. Поэтому для формального описания и моделирования распределенных семафоров на основе протоколов *Paxos* и *Raft* были выбраны временные цветные (раскрашенные) сети Петри [11], положенные в основу инструментальной системы моделирования *CPN Tools* [12].

Имитационная модель семафора должна обеспечивать следующий функционал:

- а) генерацию запросов на захват или освобождение семафора от нескольких клиентов;
- б) обработку и анализ запросов клиентов в соответствии с протоколом;
- в) отправку клиенту ответа на его запрос;
- г) сбор статистических данных при проведении моделирования.

Ввиду того что сетевые модели *Paxos* и *Raft* довольно громоздкие, их описание приводится ниже лишь в ограниченном объеме.

Разработанная сетевая модель системы «Распределенный семафор на основе протокола *Paxos*» имеет иерархическую структуру и содержит в себе следующие подсети:

- *System* – сеть самого верхнего уровня;
- *Client 1* и *Client 2* – подсети, имитирующие генерацию запросов на открытие/закрытие семафора от соответствующих клиентов и прием ответов;
- *SubLearner* – подсеть, которая обрабатывает пакеты, приходящие от клиентов, анализирует их и выносит решение об отправке пакета в подсеть *Proposer* или отправляет клиенту ответ о невозможности выполнения его запроса;
- *Proposer*, *Acceptor 1*, *Acceptor 2*, *Acceptor 3*, *Learner* – подсети, имитирующие работы соответствующих ролей протокола *Paxos*.

Сеть *System*, фрагменты которой представлены на рис. 1 и 2, содержит в себе две подсети *Client*, одну подсеть *SubLearner*, одну подсеть *Proposer*, три подсети *Acceptor* и одну подсеть *Learner*. Содержимое макропереходов, входящих в эти сети, не представлено ввиду ограниченности объема данной статьи. В случае использования протокола *Raft* сеть *System* содержит в себе две подсети *Client*, одну подсеть *Leader_RAFT* и три подсети *Sub_RAFT*.

С разработанными сетевыми моделями была проведена серия имитационных экспериментов, в ходе которых верифицировалась правильность функционирования систем, а также собирались статистические данные.

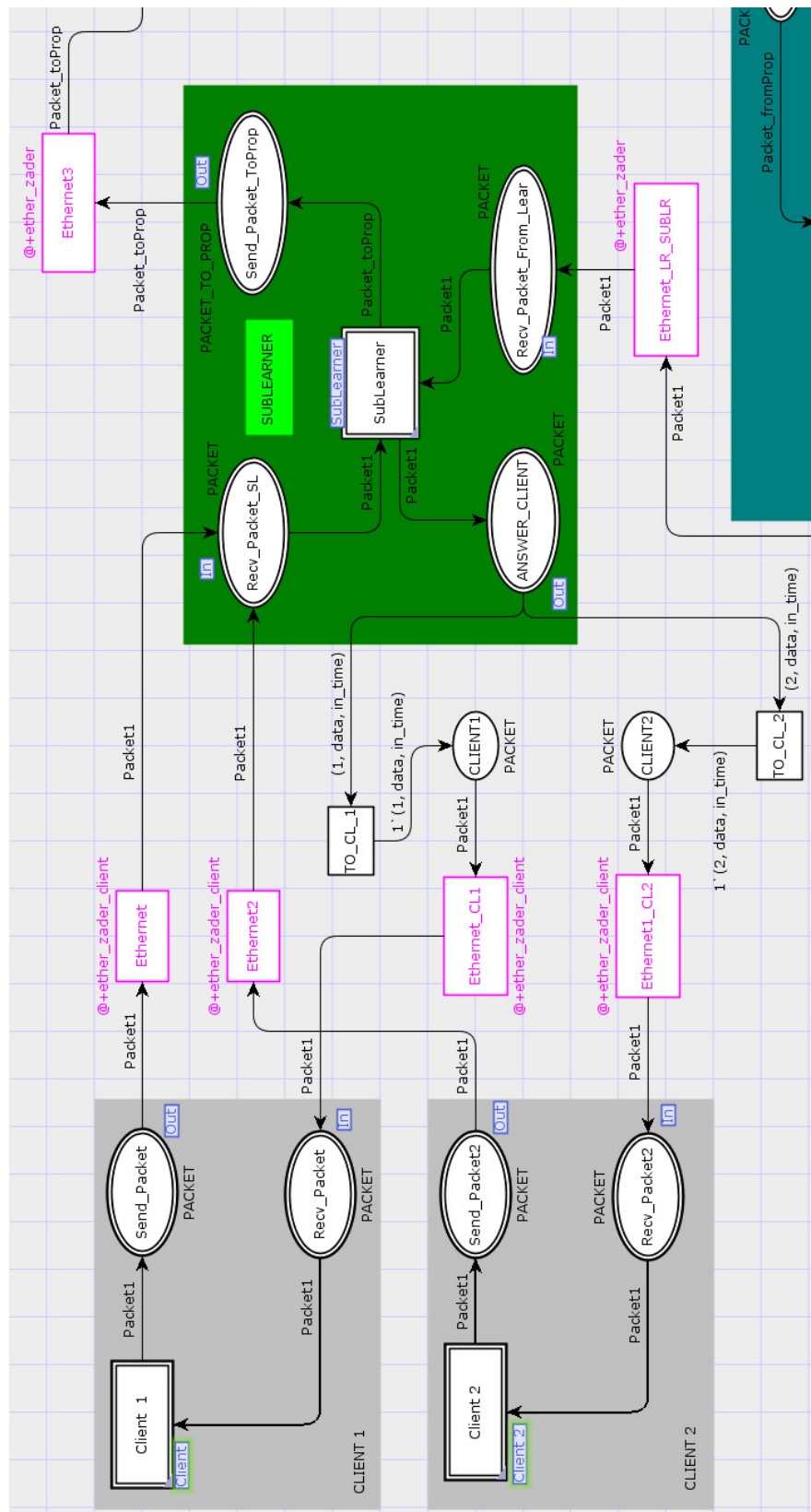


Рис. 1. Фрагмент сетевой модели верхнего уровня, содержащий подсети Client 1, Client 2 и Sublearner

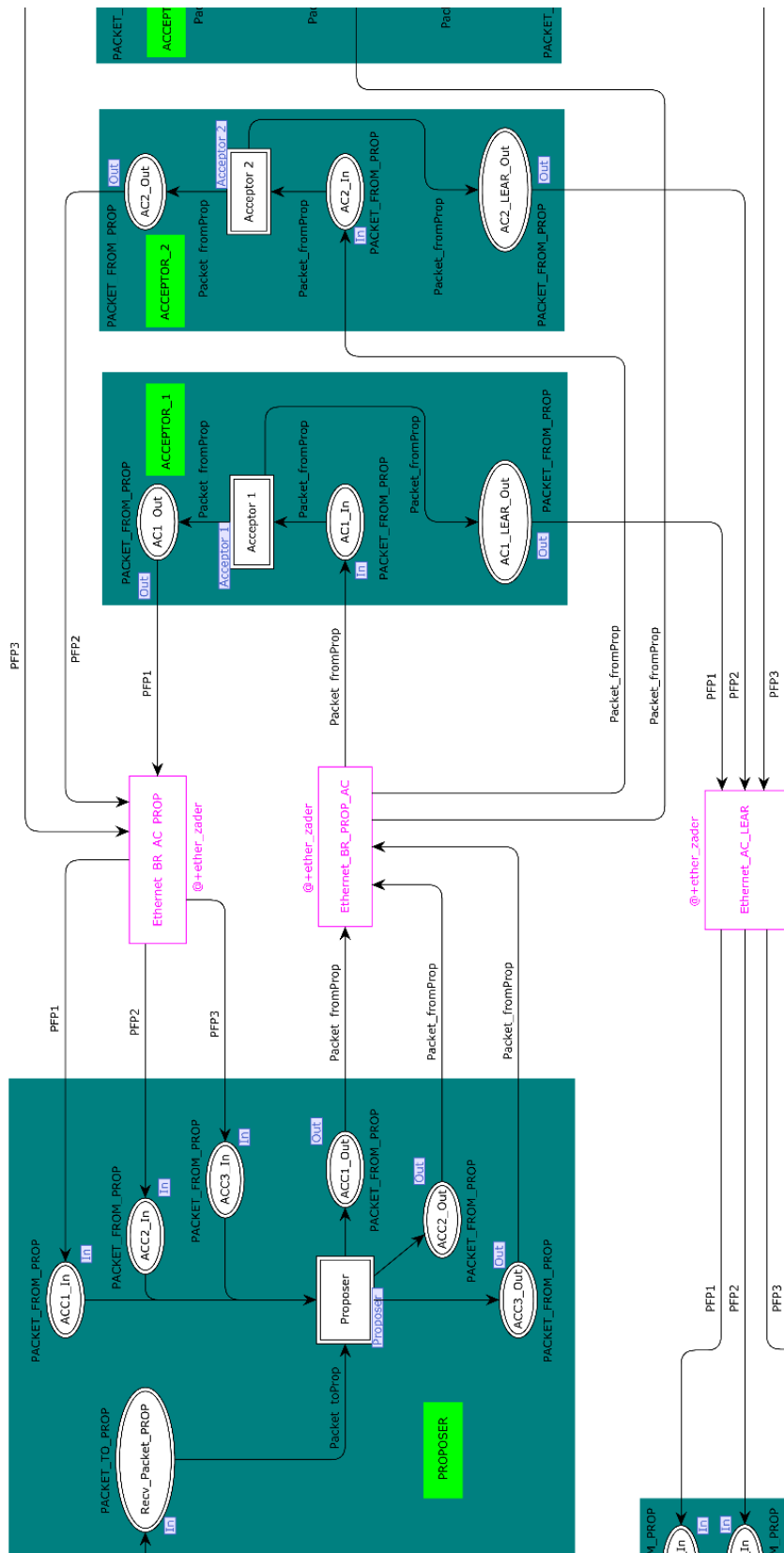


Рис. 2. Фрагмент сетевой модели верхнего уровня, содержащий подсети Acceptor 1, Acceptor 2 и Proposer

Моделирование осуществлялось при определенных временных параметрах, критерием выбора которых являлась их пригодность для сравнительной оценки двух подходов. Задержка между отправкой запросов, сгенерированных клиентом, была выбрана 10 мс, задержка при передаче данных по коммуникационной сети – 1 мс.

Значения времени, за которое каждая из подсетей (*SubLearner*, *Acceptor*, *Proposer*, *Learner*, *Leader_RAFT*, *Sub_RAFT*) выполняет обработку данных, были выбраны близкими к реальным, полученным в результате конкретных измерений в ходе отладки проекта. При проведении имитационного моделирования осуществлялся сбор следующих статистических данных:

- а) минимальное, среднее, максимальное время выполнения операции захвата или освобождения семафора;
- б) минимальное, среднее, максимальное время получения клиентом ответа на отправленный запрос;
- в) количество запросов, пришедших от клиентов, в модули;
- г) информация о состоянии семафора после успешного выполнения клиентского запроса.

В ходе анализа данных, полученных в процессе имитационного моделирования, были построены соответствующие таблицы и гистограммы. В табл. 1 представлены данные, полученные в результате анализа информационных пакетов, генерируемых при успешном выполнении операции захвата или освобождения семафора.

Таблица 1
Время успешного выполнения операций захвата/освобождения семафора

Количество величин в заданном диапазоне	PAXOS	RAFT
3–5 мс (шт.)	–	5836
5–8 мс (шт.)	5418	866
8–14 мс (шт.)	1158	0
более 14 мс (шт.)	97	0
Минимальное время	6,89 мс	3,13 мс
Среднее время	7,846 мс	3,781 мс
Максимальное время	18,12 мс	5,26 мс

На рис. 3 в качестве примера представлена гистограмма «Время получения клиентом ответа на выполненный запрос», построенная на основе результатов имитационного моделирования.

Исходя из результатов, полученных при имитационном моделировании моделей распределенного семафора на основе протоколов *Paxos* и *Raft*, можно сделать следующие выводы:

- а) в сети на основе *Raft* клиенты получали ответ на свой невыполненный запрос в среднем на 21 % быстрее, чем в сети на основе *Paxos*;
- б) в сети на основе *Raft* клиенты получали ответ на свой выполненный запрос в среднем на 46 % быстрее, чем в сети на основе *Paxos*;
- в) в сети на основе *Raft* запрос на захват или освобождение семафора выполнялся в среднем на 52 % быстрее, чем в сети на основе *Paxos*;
- г) обе сети успешно выполняли обработку запросов на захват или освобождение семафора от нескольких клиентов;

д) в обеих сетях в ходе тестирования была показана работоспособность механизма решения проблемы отказа компонента системы.

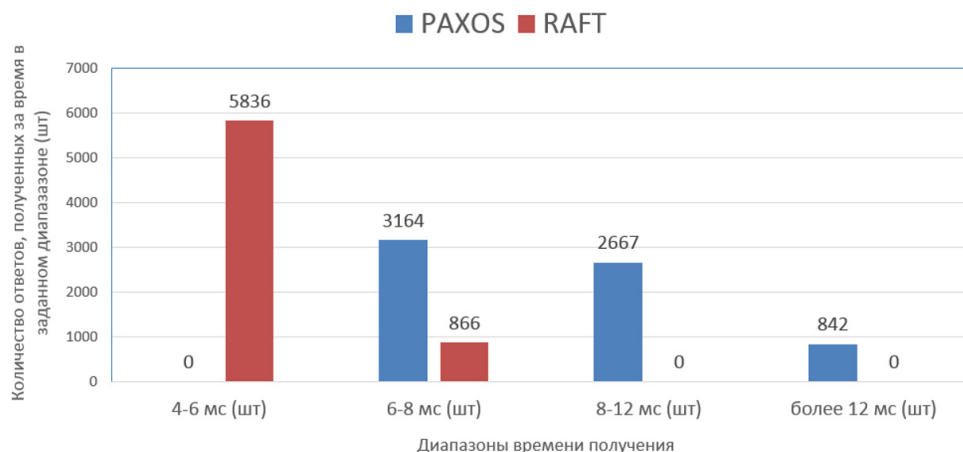


Рис. 3. Гистограмма «Время получения клиентом ответа на выполненный запрос»

Система «Распределенный семафор», реализованная с использованием алгоритма *Raft*, обладает следующими преимуществами:

- а) простота алгоритма и его реализации;
- б) возможность масштабирования системы с минимальными трудозатратами;
- в) более высокие оценки производительности.

Можно утверждать, что использование алгоритма *Raft* при построении системы распределенного семафора является более простым и эффективным способом, чем использование протокола *Paxos*. Тем не менее недостатком *Raft* является то, что сохранение согласованности между репликами затруднено при наличии асинхронности, сбоев сети и сбоев узлов.

3. Функционально-блочная реализация распределенных семафоров на основе протоколов *Paxos* и *Raft*

Функционально-блочная реализация системы «Распределенный семафор на основе протокола *Paxos*» включает 14 ФБ, разделенных на следующие группы:

- 1) составные ФБ (CLIENT), реализующие функции по генерации клиентом запросов на взятие/освобождение семафора;
- 2) функциональные САТ-блоки для организации человеко-машинного интерфейса;
- 3) составные ФБ (PROPOSER, ACCEPTOR, LEARNER), реализующие соответствующие роли протокола *Paxos*.

Составной ФБ PROPOSER включает сеть ФБ, представленную на рис. 4.

Реализованная в среде *NxtStudio* система «Распределенный семафор на основе *Paxos*» корректно функционирует при обработке запросов на захват/освобождение семафора от нескольких клиентов.

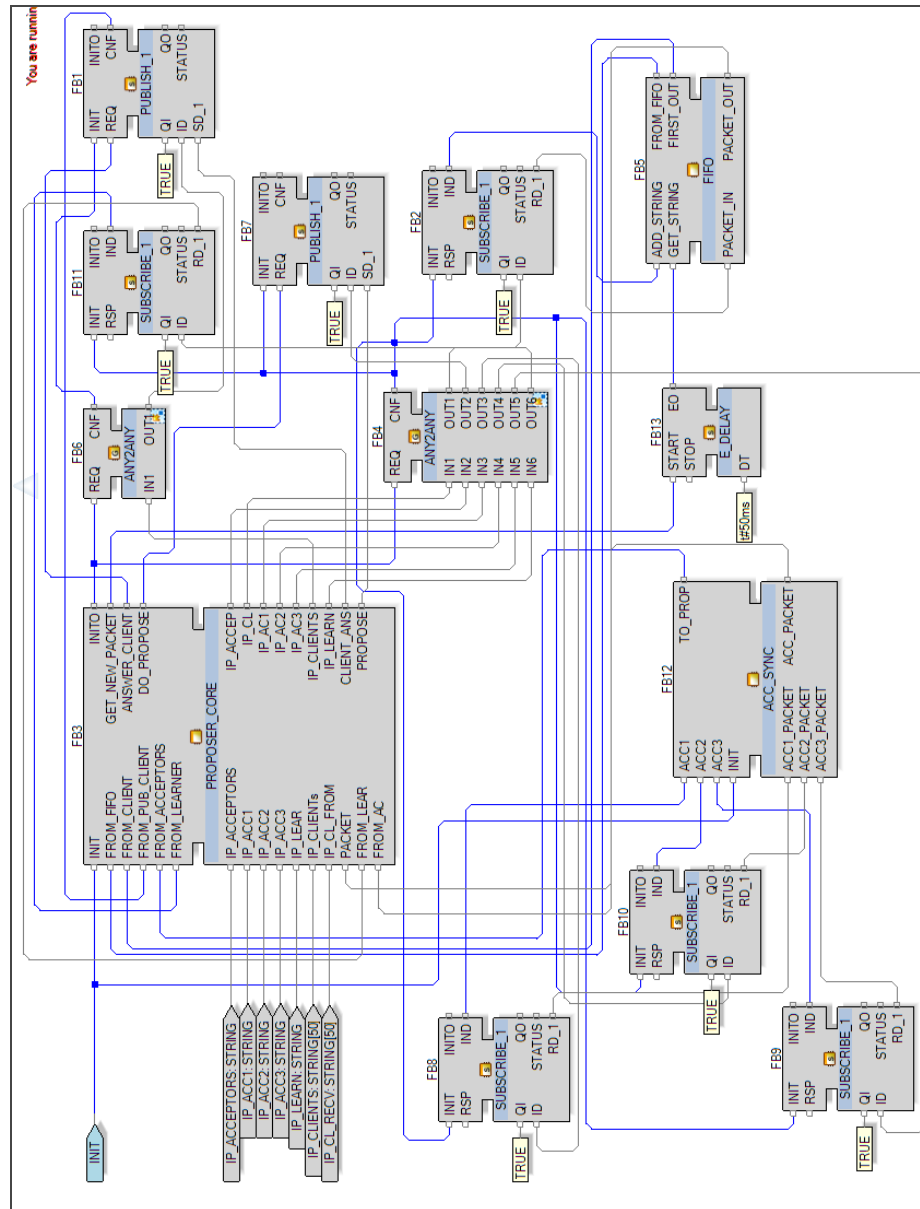


Рис. 4. Структура составного ФБ PROPOSER

При полном отказе модуля *Acceptor* система сохраняет свою работоспособность за счет особенностей протокола *Paxos*, если при этом сохраняется кворум. Описанные результаты подтверждены путем тестирования проекта на эмуляторе *SoftPLC*, входящем в среду исполнения *NxtStudio* [13].

Функционально-блочная реализация системы «Распределенный семафор на основе протокола *Raft*» включает 20 ФБ, разделенных на следующие группы:

- 1) составные ФБ (CLIENT), реализующие функции по генерации клиентом запросов на взятие/освобождение семафора;
- 2) функциональные САТ-блоки для организации человеко-машинного интерфейса;
- 3) составные ФБ (RAFT), реализующие функционал модулей протокола *Raft*.

Структура составного ФБ RAFT представлена на рис. 5.

Реализованная в среде *NxtStudio* система «Распределенный семафор на основе *Raft*» корректно функционирует при обработке запросов на захват/освобождение семафора от нескольких клиентов.

При полном отказе нескольких *Raft*-модулей (для функционирования системы требуется минимум два модуля) система сохраняет свою работоспособность за счет заложенных в алгоритм *Raft* репликации данных и алгоритма выбора нового лидера. Описанные результаты подтверждены путем тестирования проекта на эмуляторе *SoftPLC*.

Ниже приведено краткое сравнение реализаций *Paxos* и *Raft*. Протокол *Paxos* подразумевает наличие как минимум трех ролей с различным функционалом, в то время как в алгоритме *Raft* количество ролей сведено к одной, которая функционирует в двух режимах. Для сохранения работоспособности в системе на основе *Paxos* необходимо наличие одного модуля *Proposer*, двух модулей *Acceptor* и одного модуля *Learner*. Система на основе *Raft* функционирует при наличии одного модуля *Raft*, работающего в режиме лидера, и одного модуля *Raft*, работающего в режиме подчиненного. Таким образом, итоговая сеть ФБ на основе *Paxos*, получается более громоздкой, чем аналогичная сеть на основе *Raft*. В результате разработки системы в среде *NxtStudio* весь функционал протокола *Raft* вписался в составной ФБ RAFT.

При рассмотрении ситуации отказа компонентов системы также более привлекательным вариантом остается протокол *Raft*. В него изначально заложен механизм голосования при отказе модуля, работающего в режиме лидера. В результате голосования один из модулей, работающих в режиме подчиненного, становится новым лидером. Протокол *Paxos* тоже предполагает смену ролей при отказе компонента, например, с ролью *Proposer*, однако четко не определяет, модуль с какой ролью должен занять его место.

Предложенная в данной работе функционально-блочная реализация протоколов *Paxos* и *Raft* позволяет не только строить на их основе распределенные семафоры, но и обеспечивает корректную работу с распределенными данными и, таким образом, показывает путь реализации распределенных хранилищ данных в системах управления на основе ФБ.

Заключение

В данной работе были представлены следующие научные и практические результаты.

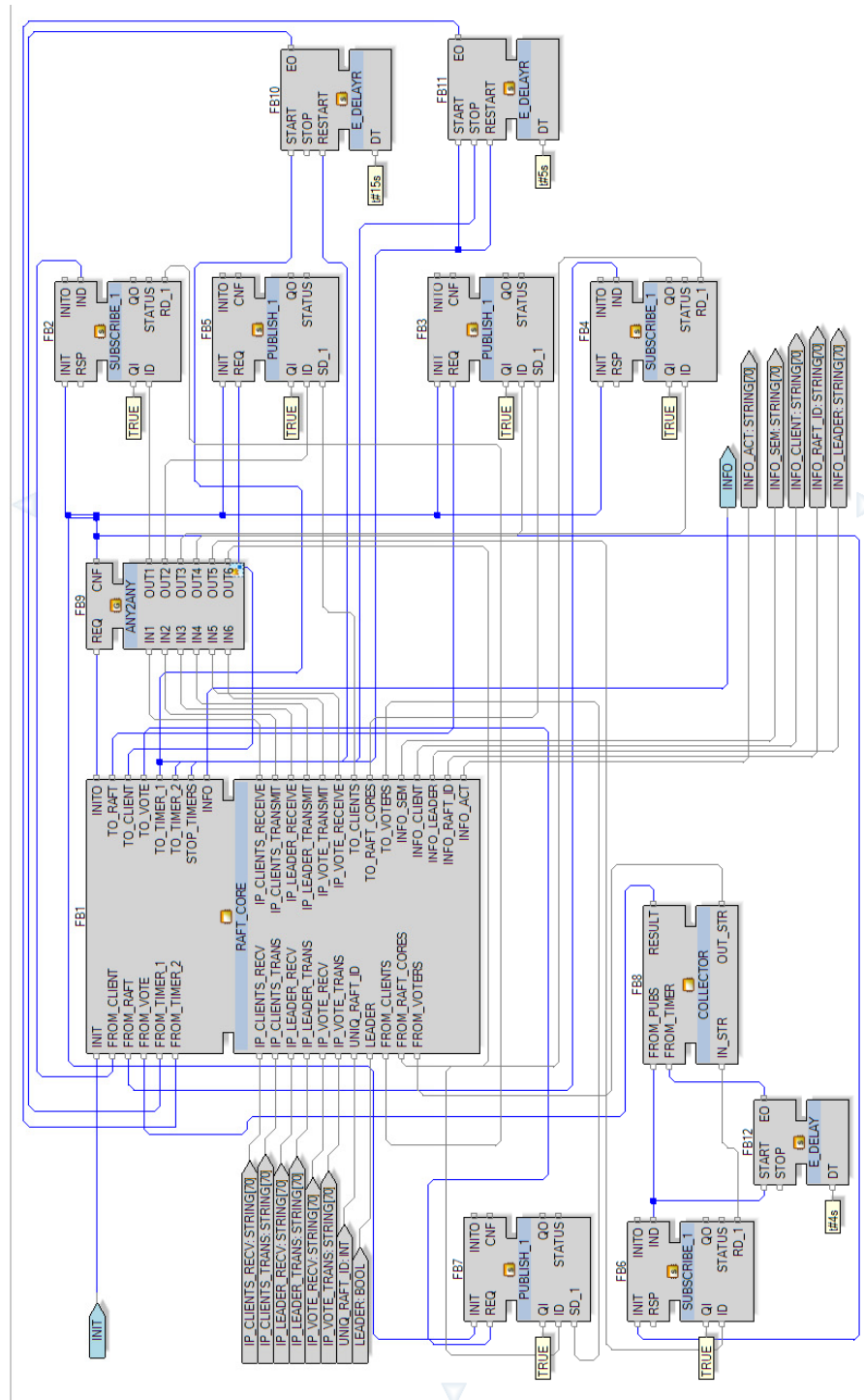


Рис. 5. Структура составного ФБ RAFT

1. Разработаны сетевые имитационные модели алгоритмов выполнения операций открытия и закрытия распределенных семафоров, основанных на алгоритмах *Paxos* и *Raft*, реализованные в системе *CPN Tools*, позволяющие производить как оценку производительности системы, так и ее верификацию.

2. Проведены имитационные эксперименты с сетевыми моделями распределенных семафоров на основе протоколов *Paxos* и *Raft*, дан сравнительный анализ и рекомендации по их использованию. Исследование обеих моделей показало корректность функционирования распределенных семафоров. Семафор на основе *Raft* оказался существенно производительнее семафора на основе *Paxos*.

3. Разработана библиотека функциональных блоков для реализации протоколов достижения консенсуса *Paxos* и *Raft*, а также распределенных семафоров на их основе, позволяющая существенно расширить возможности проектирования распределенных управляющих приложений со сложными видами взаимодействий в архитектуре IEC 61499. Данная библиотека реализована в системе *NxtStudio*.

Направлением дальнейших исследований является функционально-блочная реализация других механизмов синхронизации и взаимодействий, применимых в распределенных управляющих системах, например, механизма мониторов, задачи «производитель–потребитель», задачи «читатели–писатели» и т.д.

Библиографический список

1. Дубинин, В. Н. Модели функциональных блоков IEC 61499, их проверка и трансформации в проектировании распределенных систем управления : монография / В. Н. Дубинин, В. В. Вяткин. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – 348 с.
2. Эндрюс, Г. Р. Основы многопоточного, параллельного и распределенного программирования : пер. с англ. / Г. Р. Эндрюс. – М. : Вильямс, 2003. – 505 с.
3. Вашкевич, Н. П. Аппаратная реализация функций синхронизации параллельных процессов при обращении к разделяемому ресурсу на основе ПЛИС / Н. П. Вашкевич, Р. А. Бикташев, Е. И. Гурин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 2. – С. 3–12.
4. Yuan, S.-M. Design and implementation of a distributed semaphore facility / S.-M. Yuan, C.-J. Wu, H.-M. Lien, I.-N. Chen // Third Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems. – Taiwan, 1992. – P. 180–184.
5. Дубинин, В. Н. Реализация некоторых видов взаимодействий в системах, основанных на стандарте IEC 61499 / В. Н. Дубинин // Вычислительные системы и технологии обработки информации : межвуз. сб. науч. тр. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2005. – Вып. 3 (29). – С. 65–71.
6. Дубинин, В. Н. Децентрализованное управление распределенными данными в локальной вычислительной сети: спецификация, моделирование, реализация и применение в распределенных вычислениях / В. Н. Дубинин / Пенз. гос. техн. ун-т. – Пенза, 1997. – 78 с. – Деп. В ВИНТИ 10.06.97, № 1946-B97.
7. Ramachandran, M. Distributed semaphores. / M. Ramachandran, M. Singhal // Technical Report OSU-CISRC-6/94-TR34. – Ohio : The Ohio State University Computer and Information Science Research Center, 1994. – 20 p.
8. Lamport, L. The Part-Time Parliament // ACM Transactions on Computer Systems. – 1998. – Vol. 16, iss. 2. – P. 133–169.
9. Ongaro, D. In Search of an Understandable Consensus Algorithm / D. Ongaro, J. Ousterhout // Proc. USENIX Annual Technical Conference. – Philadelphia, 2014. – P. 305–320.

10. **Junqueira, F. P.** ZooKeeper: Distributed Process Coordination / F. P. Junqueira, B. Reed. – Sebastopol, United States : O'Reilly Media, 2013. – 246 p.
11. **Jensen, K.** Coloured Petri Nets. Modelling and Validation of Concurrent Systems / K. Jensen, L. M. Kristensen. – New York : Springer Publishing Company, 2009. – 384 p.
12. CPN Tools. – URL: <http://cpntools.org/>
13. NxtStudio. – URL: <http://www.nxtcontrol.com/>

References

1. Dubinin V. N., Vyatkin V. V. *Modeli funktsional'nykh blokov IEC 61499, ikh proverka i transformatsii v proektirovanii raspredelennykh sistem upravleniya: monografiya* [Models of functional blocks IEC 61499, their control and transformations in the design of distributed control systems: monograph]. Penza: Izd-vo PGU, 2012, 348 p.
2. Endryus G. R. *Osnovy mnogopotochnogo, parallel'nogo i raspredelenного programmirovaniya: per. s angl.* [Fundamentals of multithreaded, parallel and distributed programming: translation from English]. Moscow: Vil'yams, 2003, 505 p.
3. Vashkevich N. P., Biktashev R. A., Gurin E. I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2007, no. 2, pp. 3–12.
4. Yuan S.-M., Wu C.-J., Lien H.-M., Chen I.-N. *Third Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems*. Taiwan, 1992, pp. 180–184.
5. Dubinin V. N. *Vychislitel'nye sistemy i tekhnologii obrabotki informatsii: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Computing systems and technologies of information processing: interuniversity collected papers]. Penza: Izd-vo PGU, 2005, iss. 3 (29), pp. 65–71.
6. Dubinin V. N. *Detsentralizovannoe upravlenie raspredelennymi dannymi v lokal'noy vychislitel'noy seti: spetsifikatsiya, modelirovanie, realizatsiya i primeneniye v raspredelennykh vychisleniyakh* [Decentralized control of distributed data in a local computing network: specification, simulation, realization and application in distributed computations]. Penza, 1997, 78 p. Dep. V VINITI 10.06.97, no. 1946-V97.
7. Ramachandran M., Singhal M. *Technical Report OSU-CISRC-6/94-TR34*. Ohio: The Ohio State University Computer and Information Science Research Center, 1994, 20 p.
8. Lamport L. *ACM Transactions on Computer Systems*. 1998, vol. 16, iss. 2, pp. 133–169.
9. Ongaro D., Ousterhout J. *Proc. USENIX Annual Technical Conference*. Philadelphia, 2014, pp. 305–320.
10. Junqueira F. P., Reed B. *ZooKeeper: Distributed Process Coordination*. Sebastopol, United States: O'Reilly Media, 2013, 246 p.
11. Jensen K., Kristensen L. M. *Coloured Petri Nets. Modelling and Validation of Concurrent Systems*. New York: Springer Publishing Company, 2009, 384 p.
12. *CPN Tools*. Available at: <http://cpntools.org/>
13. *NxtStudio*. Available at: <http://www.nxtcontrol.com/>

Дубинин Виктор Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра вычислительной техники,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: dubinin.victor@gmail.com

Dubinin Viktor Nikolaevich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of computer engineering,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Беззатеев Игорь Андриянович

инженер, Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт (Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: apocalypse94@yandex.ru

Bezzateev Igor' Andriyanovich

Engineer, Penza Electrotechnical Research Institute (9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Войнов Артем Сергеевич

магистрант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: voj49@yandex.ru

Voynov Artem Sergeevich

Master's degree student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сенокосов Илья Владимирович

магистрант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: senokosov.i@yandex.ru

Senokosov Il'ya Vladimirovich

Master's degree student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.75

Дубинин, В. Н.

Моделирование и реализация распределенных семафоров в архитектуре IEC 61499 на основе протоколов для достижения консенсуса в сети ненадежных процессов / В. Н. Дубинин, И. А. Беззатеев, А. С. Войнов, И. В. Сенокосов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 4 (48). – С. 39–53. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-4-4.

УДК 519.2, 004.622, 004.056.53
DOI 10.21685/2072-3059-2018-4-5

А. П. Юнин, А. И. Иванов, К. А. Ратников, Е. А. Кольчугина

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА «БЕЛОГО» ШУМА:
РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕСТА «СТАИ ОБЕЗЬЯН»
ЧЕРЕЗ МНОЖЕСТВО СВЕРТОК ХЭММИНГА,
ПОСТРОЕННЫХ ДЛЯ РАЗНЫХ СИСТЕМ СЧИСЛЕНИЯ**

Аннотация.

Актуальность и цели. Целью работы является повышение корректности вычисления энтропии длинных кодов со слабо зависимыми разрядами, порождаемыми нейросетевыми преобразователями биометрия-код или хэшированием биометрических данных средствами облегченной криптографии.

Материалы и методы. Классические процедуры Шеннона не могут быть использованы для вычислений, так как требуют использования огромного статистического материала. Для сокращения затрат вычислительных ресурсов используется отображение обычных кодов пространство сверток Хэмминга.

Результаты. Предложено рассматривать портрет белого шума в системе сверток Хэмминга, полученных в разных системах счисления. Это эквивалентно тесту множества обезьян, каждая из которых одновременно печатает на множестве печатающих машинок совершенно разных конструкций, созданных под разные языки и разные системы письменности. Чем больше используется печатающих машинок, тем быстрее множество обезьян совместными усилиями создадут осмысленную фразу на одном из возможных языков.

Выводы. В пространстве множества сверток Хэмминга оценка качества белого шума становится корректной, если нам заранее известны параметры распределений контролируемых сверток. При этом надежность оценок тем выше, чем больше контролируется различных сверток Хэмминга и чем выше размерность вычисляемых функционалов. Так как NIST США рекомендует порядка 16 тестов на случайность, предложено применять не менее 16 типов сверток Хэмминга, построенных для различных систем счисления.

Ключевые слова: энтропия длинных кодов со слабо зависимыми разрядами, регуляризация вычислений, многообразие сверток Хэмминга, свертки Хэмминга со случайным позиционированием разрядов.

A. P. Yunin, A. I. Ivanov, K. A. Ratnikov, E. A. Kol'chugina

**QUALITY EVALUATION OF "WHITE" NOISE:
IMPLEMENTATION OF THE "MONKEYS" TEST
THROUGH A SET OF HAMMING CONVOLUTIONS
CONSTRUCTED FOR DIFFERENT NUMBER SYSTEMS**

Abstract.

Background. The aim of the work is to increase the correctness of calculating the entropy of long codes with weakly dependent bits generated by neural network bio-

© Юнин А. П., Иванов А. И., Ратников К. А., Кольчугина Е. А., 2018. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

metrics-code converters or hashing of biometric data using lightweight cryptography.

Materials and methods. The classical Shannon procedures cannot be used for calculations, since they require the use of huge statistical material. To reduce the cost of computing resources, the display of ordinary codes to the Hamming convolution space is used.

Results. It is suggested to consider a portrait of white noise in the Hamming convolution system obtained in different number systems. This is equivalent to the test of a set of monkeys, each of which simultaneously prints on a variety of printing machines of completely different designs, created for different languages and different writing systems. The more printing machines are used, the faster a lot of monkeys will jointly create an intelligent phrase in one of possible languages.

Conclusions. In the space of the Hamming convolution set, the white noise quality estimate becomes correct if we know in advance the distribution parameters of the controlled convolutions. At the same time, the reliability of the estimates is higher, the more the various Hamming convolutions are controlled and the higher the dimension of the calculated functionals. Since NIST USA recommends about 16 randomness tests, it is suggested to apply at least 16 types of Hamming convolutions constructed for various number systems.

Keywords: entropy of long codes with weakly dependent discharges, regularization of calculations, variety of Hamming convolutions, Hamming convolution with random positioning of digits.

Проблема контроля уровня случайности данных, получаемых в биометрии

Активное развитие цифровой экономики в России и за рубежом делает необходимым повсеместное (массовое) использование облегченной криптографии и биометрии. Облегченная криптография применяется в том случае, когда стоимость операций не велика и они выполняются в доверенном процессоре SIM-карты, SD-карты, 4-битном процессоре RFID-карты с микропитанием от созданного считывателем электромагнитного поля.

Возможность ослабления криптографии обусловлена также тем, что она используется не самостоятельно, а в связке с биометрией пользователя [1–3]. Биометрия и ослабленная криптография в этом случае дополняют и усиливают друг друга.

Однако проблема локального получения действительно случайных чисел (действительно белого шума) существует. При этом чем короче число, тем важнее становится контроль уровня его случайности. В этом отношении проблема контроля случайности чисел для отечественной нейросетевой биометрии оказывается менее острой, чем та же проблема для зарубежных «нечетких экстракторов» [4–7]. Зарубежные «нечеткие экстракторы» гораздо менее интеллектуальны, чем нейросетевые преобразователи биометрия-код [8, 9]. «Нечеткие экстракторы» строятся на использовании кодов, обнаруживающих и исправляющих ошибки за счет высокой избыточности. Например, Даугман [7] использует самокорректирующийся код с 20-кратной избыточностью, т.е. длина выходного кода «нечеткого экстрактора» в 20 раз короче, чем число контролируемых биометрических параметров.

В свою очередь число контролируемых биометрических параметров не может быть как угодно большим. Обычно производители средств биометри-

ческой защиты не указывают, сколько биопараметров и какие биопараметры они контролируют. Единственным исключением является среда моделирования «БиоНейроАвтограф» [10], эта среда преобразует рукописный автограф (любой рукописный знак) в 416 контролируемых биометрических параметров (416 коэффициентов двумерного преобразования Фурье рукописного образа). Положительным свойством среды моделирования «БиоНейроАвтограф» является то, что на данный момент времени это единственный достоверный источник биометрической информации для студентов, аспирантов, преподавателей русскоязычных университетов. Все данные среды моделирования доступны для наблюдения [11], могут быть перегружены в иной математический редактор: MathCAD, MatLAB, Mathematica. Далее пользователь уже сам может написать собственную нейросетевую обработку биометрических данных в рамках курсового проекта, дипломной работы или диссертации.

Если вернуться к заявленной тематике, то для данных среды моделирования «БиоНейроАвтограф» «нечеткий экстрактор» будет иметь выходной личный ключ длиной $416/20 = 21$ бит. Такая длина кода несопоставимо меньше, чем 256 бит ключей, получаемых штатным нейросетевым преобразователем среды «БиоНейроАвтограф». При использовании ключа длиной в 21 бит требования к уровню его случайности на много выше, чем к уровню случайности ключа в 256 бит. Тем не менее контролировать уровень случайности выходного ключа или значение его энтропии нужно для любой из существующих сегодня биометрических технологий.

Синтез личного криптографического ключа из неоднозначных компонент биометрических данных

Особенностью биометрии является то, что каждый пример реализации одного и того же биометрического образа отличается от других примеров. Для выделения из них нестабильной компоненты достаточно взять два примера биометрического образа, осуществить центрирование и нормирование их данных и получить их разность. Эта ситуация отображена на рис. 1. Если теперь проквантовать эту разность, мы получим случайную последовательность.

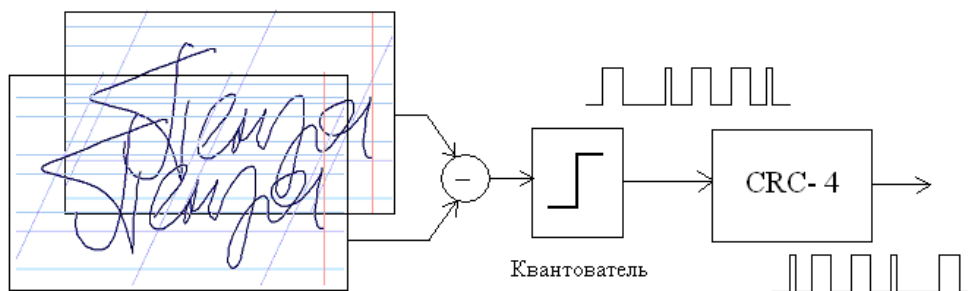


Рис. 1. Получение случайной последовательности из двух примеров одного биометрического образа

При вычитании стабильная часть примеров рукописного биометрического образа «Пенза» устраняется, подчеркивается его нестабильная часть. Появление нестабильной части биометрических примеров обусловлено влия-

нием множества факторов, точно повторить рукописный образ человек не может даже в случае попытки его обвода по шаблону.

Для того чтобы усилить полученную случайную последовательность, достаточно получить другую псевдослучайную последовательность от программного генератора и сложить их по модулю два. Можно поступить иначе и усилить случайную последовательность пропустив ее через нелинейную рекурсивную свертку, например, CRC-4 (подсчет контрольных сумм).

Если бы мы вычислили криптографическую хэш-функцию от полученной случайной последовательности [3], то можно было бы ее использовать для получения личного ключа без исследования ее качества. То что мы, ориентируясь на малые вычислительные ресурсы, применили некриптографическое хэширование в форме рекурренты CRC-4, приводит к необходимости оценки энтропии ключа. Заранее неизвестно, достаточно ли стандартная рекуррента CRC-4 увеличивает энтропию естественной нестабильности примеров биометрического образа.

Традиционные методы контроля качества криптографического ключа

В системах, обеспечивающих информационную безопасность, контролю качества случайных последовательностей при генерации криптографического ключа уделяется значительное внимание. В частности, национальный институт стандартизации США (NIST) рекомендует при таком контроле использовать 16 тестов:

1. **Частотный тест** – исследуется вероятность появления состояний «0» и «1» в коде ключа длиной не менее 100 бит.
2. **Блочный тест на частоту** – исследуется частота повторения блоков длиной 2, 3, ..., k бит (когда $k = 1$ тест совпадает с предыдущим).
3. **Тест на серийность** – исследуется вероятность появления серии из одинаковых состояний «000..0» или «111..1».
4.

Параллельно с тестами NIST на практике широко применимы 10 тестов, разработанных Джорджем Марсельи для оценки качества случайных чисел:

1. **Дни рождения** – выбираются случайные точки на большом интервале, расстояния между которыми должны иметь Пуассоновское распределение.
2. **Пересекающиеся перестановки** – анализируются последовательности пяти случайных чисел, 120 перестановок которых должны давать заранее известное распределение значений.
3. **Тест стаи обезьян** – анализируемая числовая последовательность рассматривается как кодировка некоторого текста, набранного одной из стаи обезьян. Как правило, используется одна из общепринятых кодировок, проверяемая последовательность анализируется на появления осмысленных слов из словаря некоторого естественного языка (английского, русского, французского, ...).
4.

Применение тестов NIST и Марсельи – это вынужденная мера, обусловленная огромной вычислительной сложностью попыток прямого вычисления энтропии длинных чисел по Шеннону. Проблема состоит в том, что для прямого вычисления энтропии одного бита кода требуется выборка из $2^{1+8} = 512$ примеров. Для оценки энтропии двух бит потребуется $2^{2+8} = 1024$ примеров состояний контролируемого кода. Мы наблюдаем экспоненциальный рост вычислительной сложности задачи и экспоненциальный рост объема необходимой выборки исследуемых кодов. Попытка прямого вычисления энтропии 256 разрядов кода потребует оценки вероятности появления 2^{256} состояний на выборке 2^{256+8} примеров кода. Создавать и проверять подобные объемы данных на обычной вычислительной машине технически невозможно.

Контроль энтропии в пространстве однобитных сверток Хэмминга

Выходом из этого тупика является отказ от анализа вероятностей появления редких кодовых комбинаций за счет перехода в пространство расстояний Хэмминга между кодами и некоторой последовательностью случайных чисел [2]:

$$h = 256 - \sum_{i=1}^{256} ("c_i") \oplus ("x_i"), \quad (1)$$

где $"\tilde{n}_i"$ – i -й разряд проверяемого разряда кода синтезированного ключа; $"x_i"$ – эталонная последовательность некоторого шума.

Принципиальное преимущество перехода от обработки обычных кодов к работе со свертками Хэмминга (1) состоит в том, что размер выборки кодов сокращается логарифмически до величины $\log_2(2^{256+8}) = 256 + 8$.

Если мы будем иметь ключ $"\tilde{n}"$ с независимыми разрядами, то множество сверток Хэмминга (1) с фрагментами идеального «белого» шума должно давать следующие статистические моменты в зависимости от распределения Бернулли для 256 независимых опытов:

$$\begin{cases} E(h) = 128 \text{ бит}, \\ \sigma(h) = 8 \text{ бит}. \end{cases} \quad (2)$$

В случае, если математическое ожидание Хэмминга $E(h)$ будет существенно отличаться от значения 128 бит, мы получим отсутствие баланса равновероятных состояний «0» и «1» во всех разрядах кода. Если стандартное отклонение $\sigma(h)$ будет существенно больше 8 бит, то мы должны сделать вывод о наличии сильной корреляционной связи разрядов синтезированного кода ключа.

Контроль энтропии в пространстве 8-битных кодировок

В качестве эталонных последовательностей «не белого» шума, например, могут быть взяты фрагменты текста на русском языке [12–14]. Каждый из фрагментов текста на русском языке при вычислении расстояний Хэммин-

га фактически накрывается гаммой синтезированного ключа. Выполнение условия (2) эквивалентно покрытию текста идеальной гаммой. После чего защищенный гаммой текст становится «белым» шумом.

Следует отметить, что снижение криптографических свойств синтезированного ключа " $\tilde{n}$ " возникает в очевидном случае замены его на код осмысленного пароля [13, 14]. Естественно, что улучшение криптографических качеств ключа " $\tilde{n}$ " будет монотонно приближаться к выполнению условий (2).

В работах [13, 14] показано, что при вычислениях энтропии русского языка приходится учитывать 8-битную кодировку русских и английских текстов. В этом случае расстояние Хэмминга будет вычисляться следующим образом:

$$h_8 = \sum_{i=1}^{32} |c_i, \tilde{n}_{i+1}, \dots, c_{i+7} - x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+7}|, \quad (3)$$

где " $\tilde{n}_i, c_{i+1}, \dots, c_{i+7}$ " – 8 бит кода в i -м фрагменте кода ключа; " $x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+7}$ " – 8 бит кода образцового текста, принадлежащего i -му знаку эталонной последовательности.

Очевидно, что для свертки Хэмминга по модулю 256 (3) могут быть найдены ограничения на математическое ожидание и стандартное отклонение типа (2). Пользуясь близостью к этим ограничениям, мы всегда сможем оценить то, насколько тестируемая последовательность " $\tilde{n}$ " близка к «белому» шуму.

Для нас принципиально важно то, что результаты тестирования через однократные свертки Хэмминга (1) и тестирования в 8-битных свертках Хэмминга по модулю 256 сильно различаются [14].

Множество сверток Хэмминга, вычисленных обычными процессорами в системах счисления, кратных двум

Фактически мы имеем две свертки Хэмминга по модулю 2 (выражение (1)) и по модулю 256 (выражение (3)). Свертку по модулю два (1) можно рассматривать как эквивалент теста стаи обезьян, набирающих текст на русском языке до его полного совпадения с контрольным фрагментом на однократной печатающей машинке. Свертку по модулю 256 32 знаков образцового русского текста (3) следует рассматривать как обычную печатающую машинку в руках стаи обезьян.

Исходя из этой интерпретации, мы можем предложить промежуточные свертки для других печатающих машинок:

$$h_2 = \sum_{i=1}^{128} |\tilde{n}_i, \tilde{n}_{i+1} - x_i, x_{i+1}|, \quad (4)$$

$$h_4 = \sum_{i=1}^{64} |\tilde{n}_i, \tilde{n}_{i+1}, \dots, \tilde{n}_{i+3} - x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+3}|, \quad (5)$$

$$h_{16} = \sum_{i=1}^{32} |\tilde{n}_i, \tilde{n}_{i+1}, \dots, \tilde{n}_{i+15} - x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+15}|, \quad (6)$$

$$h_{32} = \sum_{i=1}^{16} |\tilde{n}_i, \tilde{n}_{i+1}, \dots, \tilde{n}_{i+31} - x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+31}|, \quad (7)$$

$$h_{64} = \sum_{i=1}^8 |\tilde{n}_i, \tilde{n}_{i+1}, \dots, \tilde{n}_{i+63} - x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+63}|. \quad (8)$$

Множество процессоров с нечетным числом бит, на которых могут быть построены печатающие машинки для стаи обезьян

Все описанные выше конструкции легко согласуются с 2, 4, 8, 16, 32, 64-битными процессорами под создаваемые для стаи обезьян печатающие машинки с конвертируемой друг в друга арифметикой. В этих случаях мы имеем дело с обычными процессорами, имеющими конверторы из одной арифметики в арифметику другой разрядности без потери точности вычислений.

Могут существовать процессоры с некратной друг другу нечетной разрядностью. Для таких процессоров нельзя построить конверторы из одной арифметики в другую без потери точности. Анализируемая последовательность из 256 бит не укладывается кратно в арифметики с нечетной двоичной разрядностью. Следует пойти на отбрасывание малой части анализируемого кода и применить сверки Хэмминга по нечетным значениям модуля:

$$h_3 = \sum_{i=1}^{85} |\tilde{n}_i, \tilde{n}_{i+1}, \tilde{n}_{i+2} - x_i, x_{i+1}, x_{i+2}|, \quad (9)$$

$$h_5 = \sum_{i=1}^{51} |\tilde{n}_i, \tilde{n}_{i+1}, \dots, \tilde{n}_{i+4} - x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+4}|, \quad (10)$$

$$h_7 = \sum_{i=1}^{36} |\tilde{n}_i, \tilde{n}_{i+1}, \dots, \tilde{n}_{i+6} - x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+6}|, \quad (11)$$

.....

На ряду с девятью печатающими машинками, имеющими процессоры с четным числом бит, мы имеем дополнительно 247 печатающих машинок с процессорами, имеющими нечетное число разрядов и вполне пригодными для вычисления еще 247 сверток Хэмминга. В итоге мы для проверки кода длиной 256 бит получаем $247 + 9 = 256$ печатающих машинок. Анализ каждой из сверток Хэмминга следует рассматривать как некоторого независимого наблюдателя уровня случайности кода. В итоге мы можем создать 256-мерное средство наблюдения уровня случайности кодовой последовательности.

Естественно, что столь большое число наблюдателей должно быть избыточно. По рекомендациям NIST США обычно применяют часть из 16 тестов на случайность или часть из 10 тестов Марсели. При анализе качества ключей, полученных из нестабильной части биометрических данных, предположительно, будет достаточно учета первых 16 светрков Хэмминга. Уверенность в качестве предлагаемого технического решения обусловлена тем,

что свертки Хэмминга $h_2, h_3, \dots, h_{17}$ независимы ($r(h_i, h_j) \approx 0$ при $i \neq j$). Этот факт подтвержден экспериментально.

Следует также отметить, что этот тип задач по созданию быстрых алгоритмов оценки энтропии длинных кодов применим достаточно широко. В частности, такой подход может улучшить решение обратных задач нейросетевой биометрии [15].

Заключение

Если реализовывать все 16 тестов на случайность NIST в дополнение к реализации всех 10 тестов Марсельи, то мы получим некоторый 26-мерный анализатор близости случайной последовательности к «белому» шуму. Предложенный в данной статье подход позволяет, независимо от 26-мерного тестера NISN и Марсельи, реализовать 256-мерный тестер Хэмминга. Очевидно, что 10-кратное увеличение размерности задачи, решаемой тестером Хэмминга, открывает новые возможности. Авторы статьи предполагают, что рассмотренный новый подход к тестированию уровня случайности позволит безопасно получать личные криптографические ключи пользователей из случайной компоненты их уникальных биометрических образов. После каждого синтеза личного криптографического ключа пользователь должен иметь возможность проверить его качество, запустив встроенную программу тестирования.

Библиографический список

1. **Волчихин, В. И.** Быстрые алгоритмы обучения нейросетевых механизмов биометрико-криптографической защиты информации : монография / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2005. – 273 с.
2. **Малыгин, А. Ю.** Быстрые алгоритмы тестирования нейросетевых механизмов биометрико-криптографической защиты информации / А. Ю. Малыгин, В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2006. – 161 с.
3. Техническая спецификация (проект, публичное обсуждение начато с 01.02.2017 членами ТК 26 «Криптографическая защита информации»). Защита нейросетевых биометрических контейнеров с использованием криптографических алгоритмов. – URL: <https://tc26.ru>
4. **Dodis, Y.** Fuzzy Extractors: How to Generate Strong Keys from Biometrics and Other Noisy / Y. Dodis, L. Reyzin, A. Smith // Proc. EUROCRYPT. – 2004. – April 13. – P. 523–540.
5. **Monrose, F.** Cryptographic key generation from voice / F. Monrose, M. Reiter, Q. Li, S. Wetzel // Proc. IEEE Symp. on Security and Privacy. – 2001. – P. 202–213.
6. **Ramirez-Ruiz, J.** Cryptographic Keys Generation Using FingerCodes / J. Ramirez-Ruiz, C. Pfeiffer, J. Nolasco-Flores // Advances in Artificial Intelligence – IBERAMIA-SBIA. – 2006 (LNCS 4140). – P. 178–187.
7. **НАО, F.** Crypto with Biometrics Effectively / F. Hao, R. Anderson, J. Daugman // IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTERS. – 2006. – Vol. 55, № 9. – P. 1073–1074.
8. **Иванов, А. И.** Нечеткие экстракторы: проблема использования в биометрии и криптографии / А. И. Иванов // Первая миля. – 2015. – № 1. – С. 40–47.
9. **Иванов, А. И.** Сопоставительный анализ показателей конкурирующих технологий биометрико-криптографической аутентификации личности / А. И. Иванов // Защита информации. ИНСАЙД. – 2014. – № 3. – С. 32–39.

10. **Иванов, А. И.** Среда моделирования «БиоНейроАвтограф». Программный продукт создан лабораторией биометрических и нейросетевых технологий, размещен с 2009 г. на сайте АО «ПНИЭИ» / А. И. Иванов, О. С. Захаров. – URL: www.пниэи.рф, <http://пниэи.рф/activity/science/noc./bioneuroautograph.zi>.
11. **Иванов, А. И.** Автоматическое обучение больших искусственных нейронных сетей в биометрических приложениях : учеб. пособие к пакету лабораторных работ, выполняемых в среде моделирования «БиоНейроАвтограф». – Пенза : ОАО «ПНИЭИ», 2013. – 27 с. – URL: http://пниэи.рф/activity/science/noc/tm_IvanovAI.pdf
12. **Иванов, А. И.** Многомерная нейросетевая обработка биометрических данных с программным воспроизведением эффектов квантовой суперпозиции / А. И. Иванов. – Пенза : ОАО «ПНИЭИ», 2016. – 133 с. – URL: <http://пниэи.рф/activity/science/BOOK16.pdf>
13. **Волчихин, В. И.** Многомерный портрет цифровых последовательностей идеального «белого шума» в свертках Хэмминга / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, А. П. Юнин, Е. А. Малыгина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 4 (44). – С. 4–13.
14. **Юнин, А. П.** Оценка энтропии легко запоминаемых, длинных паролей со смыслом в ASCII кодировке для русского и английского языков / А. П. Юнин, О. В. Корнеев // Труды научно-технической конференции кластера пензенских предприятий, обеспечивающих безопасность информационных технологий. – Пенза, 2016. – Т. 10. – С. 40–42. – URL: <http://пниэи.рф/activity/science/BIT/T10-p40.pdf>
15. **Волчихин, В. И.** Нейросетевая молекула: решение обратной задачи биометрии через программную поддержку квантовой суперпозиции на выходах сети искусственных нейронов / В. И. Волчихин, А. И. Иванов // Вестник Мордовского университета. – 2017. – Т. 27, № 4. – С. 518–523.

References

1. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Funtikov V. A. *Bystrye algoritmy obucheniya neyrosetevykh mekhanizmov biometriko-kriptograficheskoy zashchity informatsii: monografiya* [Fast algorithms for training of neural network mechanisms of biometric-cryptographic information protection: monograph]. Penza: Izd-vo PGU, 2005, 273 p.
2. Malygin A. Yu., Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Funtikov V. A. *Bystrye algoritmy testirovaniya neyrosetevykh mekhanizmov biometriko-kriptograficheskoy zashchity informatsii* [Fast algorithms for testing of neural networks mechanisms of biometric-cryptographic information protection]. Penza: Izd-vo PGU, 2006, 161 p.
3. *Tekhnicheskaya spetsifikatsiya (proekt, publichnoe obsuzhdenie nachato s 01.02.2017 chlenami TK 26 «Kriptograficheskaya zashchita informatsii»)*. Zashchita neyrosetevykh biometricheskikh konteynerov s ispol'zovaniem kriptograficheskikh algoritmov [Technical specification (draft, public discussion initiated on 01.02.2017 by members of TC 26 “Cryptographic protection of information”). Protection of neural network biometric containers using cryptographic algorithms]. Available at: <https://tc26.ru>
4. Dodis Y., Reyzin L., Smith A. *Proc. EUROCRYPT*. 2004, April 13, pp. 523–540.
5. Monroe F., Reiter M., Li Q., Wetzel S. *Proc. IEEE Symp. on Security and Privacy*. 2001, pp. 202–213.
6. Ramírez-Ruiz J., Pfeiffer C., Nolasco-Flores J. *Advances in Artificial Intelligence – IBERAMIA-SBIA*. 2006 (LNCS 4140), pp. 178–187.
7. Hao F., Anderson R., Daugman J. *IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTERS*. 2006, vol. 55, no. 9, pp. 1073–1074.
8. Ivanov A. I. *Pervaya milya* [First mile]. 2015, no. 1, pp. 40–47.
9. Ivanov A. I. *Zashchita informatsii. INSAYD* [Information protection. INSIDE]. 2014, no. 3, pp. 32–39.

10. Ivanov A. I., Zakharov O. S. *Sreda modelirovaniya «BioNeyroAvtograf»*. Programnyy produkt sozdan laboratoriei biometricheskikh i neyrosetevykh tekhnologiy, razmeshchen s 2009 g. na sayte AO «PNIEI» [Simulating environment “BioNeuroAutograph”. The software created by the laboratory of biometric and neural network technologies, has been available since 2009 on the site of JSC “PNIEI”]. Available at: www.pniei.rf, <http://pniei.rf/activity/science/noc./bioneuroautograph.zi>.
11. Ivanov A. I. *Avtomaticheskoe obuchenie bol'shikh iskusstvennykh neyronnykh setey v biometricheskikh prilozheniyakh: ucheb. posobie k paketu laboratornykh rabot, vypolnyaemykh v srede modelirovaniya «BioNeyroAvtograf»* [Automatic training of large artificial neural networks in biometric applications: tutorial to a set of laboratory works in the “Bio NeuroAutograph” simulating environment]. Penza: OAO «PNIEI», 2013, 27 p. Available at: http://pniei.rf/activity/science/noc/tm_IvanovAI.pdf
12. Ivanov A. I. *Mnogomernaya neyrosetevaya obrabotka biometricheskikh dannykh s programnym vosproizvedeniem effektov kvantovoy superpozitsii* [Multidimensional neural network processing of biometric data with software reproduction of quantum superposition effects]. Penza: OAO «PNIEI», 2016, 133 p. Available at: <http://pniei.pf/activity/science/BOOK16.pdf>
13. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Yunin A. P., Malygina E. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2017, no. 4 (44), pp. 4–13.
14. Yunin A. P., Korneev O. V. *Trudy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii klastera penzenskikh predpriyatiy, obespechivayushchikh bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy* [Proceedings of a scientific and technical conference of the cluster of Penza's enterprises in the field of IT security]. Penza, 2016, vol. 10, pp. 40–42. Available at: <http://pniei.rf/activity/science/BIT/T10-p40.pdf>
15. Volchikhin V. I., Ivanov A. I. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Bulletin of Mordovia University]. 2017, vol. 27, no. 4, pp. 518–523.

Юнин Алексей Петрович

специалист, Пензенский
научно-исследовательский
электротехнический институт (Россия,
г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: pniei@penza.ru

Yunin Aleksey Petrovich

Specialist, Penza Research Institute
of Electrical Engineering (9 Sovetskaya
street, Penza, Russia)

Иванов Александр Иванович

доктор технических наук, доцент,
начальник лаборатории биометрических
и нейросетевых технологий,
Пензенский научно-исследовательский
электротехнический институт (Россия,
г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: ivan@pniei.penza.ru

Ivanov Aleksandr Ivanovich

Doctor of engineering sciences, associate
professor, head of the laboratory
of biometric and neural network
technologies, Penza Research Institute
of Electrical Engineering (9 Sovetskaya
street, Penza, Russia)

Ратников Кирилл Андреевич

специалист, Пензенский
научно-исследовательский
электротехнический институт (Россия,
г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: pniei@penza.ru

Ratnikov Kirill Andreevich

Specialist, Penza Research Institute
of Electrical Engineering (9 Sovetskaya
street, Penza, Russia)

Кольчугина Елена Анатольевна

доктор технических наук, профессор,
кафедра математического обеспечения
и применения ЭВМ, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: kea@pnzgu.ru

Kol'chugina Elena Anatol'evna

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of computer software
and application, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 519.2, 004.622, 004.056.53

Юнин, А. П.

**Оценка качества «белого» шума: реализация теста «стаи обезьян»
через множество сверток Хэмминга, построенных для разных систем
счисления / А. П. Юнин, А. И. Иванов, К. А. Ратников, Е. А. Кольчугина //**
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические
науки. – 2018. – № 4 (48). – С. 54–64. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-4-5.

А. В. Майоров, С. А. Сомкин, А. П. Юнин, А. Ж. Акмаев

ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ ЗАЩИЩЕННЫХ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ БИОМЕТРИЯ-КОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОЛЬШИХ БАЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ОБРАЗОВ

Аннотация.

Актуальность и цели. Целью работы является тестирование стойкости к атакам подбора нейросетевых контейнеров, в которых таблицы связей нейронов и таблицы их весовых коэффициентов защищены гаммированием.

Материалы и методы. Используется база естественных биометрических образов «Чужой». Далее проверяется, сколько первых бит ключа подбирается на базе естественных биометрических образов. После этого размер базы увеличивают путем скрещивания образов-родителей и получения образов-потомков алгоритмом ГОСТ Р 52633.2. Контролируют размеры монотонно увеличивающейся тестовой базы и число подобранных на ней бит ключа.

Результаты. В логарифмической шкале размер тестовой базы связан линейно с длиной ключа, подбираемого при численном эксперименте. Пользуясь этим свойством, удается прогнозировать время, которое займет подбор ключа длиной 256 или 512 бит по данным реального подбора длины ключа от 40 до 64 бит.

Выводы. Защита таблиц связей нейронов гаммированием позволяет реализовать механизм размножения ошибок. Одной ошибки образа «Чужой» на одном нейроне достаточно, чтобы все последующие таблицы связей нейронов восстановились неправильно. Возникает эффект размножения ошибок.

Ключевые слова: нейросетевой преобразователь биометрия-код, гаммирование таблиц связей нейронов, размножение биометрических образов.

A. V. Mayorov, S. A. Somkin, A. P. Yunin, A. Zh. Akmaev

ESTIMATION OF RESISTANCE OF PROTECTED NEURONET BIOMETRICS-ACCESS CODE CONVERTERS USING LARGE BASES OF SYNTETIC BIOMETRIC IMAGES

Abstract.

Background. The aim of the work is to test the resistance to attacks of a selection of neural network containers where the neuron link tables and the tables of their weights are protected by gamming.

Materials and methods. The base of “Foe” natural biometric images is used. Next, it is checked how many first bits of the key are picked on the basis of natural biometric images. After that, the size of the base is increased by crossing the parent images and obtaining the descendant images by the algorithm of GOST R 52633.2.

© Майоров А. В., Сомкин С. А., Юнин А. П., Акмаев А. Ж., 2018. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

The size of the monotonously increasing test base and the number of key bits picked on it are controlled.

Results. In a logarithmic scale, the size of the test base is linearly related to the key length selected in a numerical experiment. Using this property, it is possible to predict the time taken to pick a key of 256 or 512 bits in length according to the real picking of a key of 40 to 64 bits in length.

Conclusions. Protection of neuron link tables by gamming allows for the implementation of an error propagation mechanism. One error of the “Foe” image on one neuron is enough for all subsequent neuron connection tables to recover incorrectly. There occurs the error propagation effect.

Keywords: neural network biometrics-code converter, gamming of neuron connection tables, reproduction of biometric images.

1. Совместное использование биометрии и криптографии

Переход к цифровой экономике приводит к необходимости создания механизмов повышения доверия к электронным документам, находящимся в открытом информационном пространстве (например, хранящимся на облачных сервисах). Традиционные методы криптографической защиты информации (шифрование, формирование цифровой подписи) обладают низкой эргономичностью. Обычный пользователь не может запомнить длинный пароль из случайных знаков или свой криптографический ключ. В связи с этим в России [1, 2] и за рубежом [3–5] активно развиваются методы преобразования личной биометрии человека в его криптографический ключ.

На рис. 1 приведена схема так называемых «нечетких экстракторов» и схема нейросетевых преобразователей биометрия-код.

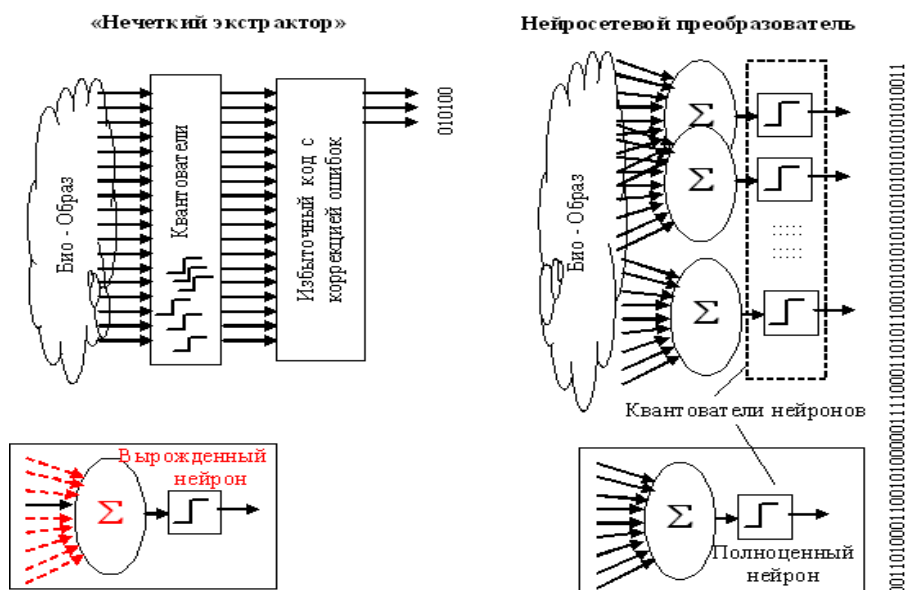


Рис. 1. Схемы организации «нечетких экстракторов» и нейросетевых преобразователей биометрия-код

Из рисунка видно, что выходной код криптографического ключа «нечетких экстракторов» короткий. Это происходит из-за того, что «нечеткие

экстракторы» используют классические коды с высокой избыточностью, способные обнаруживать и корректировать ошибки. Так, Даугман [5] при корректировке кода, получаемого из рисунка радужной оболочки глаза, использует код с 20-кратной избыточностью. То есть при расчете длины выходного ключа число входных биометрических параметров следует уменьшить в 20 раз для «нечетких экстракторов». Как следствие, «нечеткие экстракторы» нельзя применять совместно с сильными криптографическими схемами, ориентированными на использование длинных криптографических ключей.

Ситуация меняется, когда используются нейросетевые преобразователи биометрия-код [1, 2]. В таких конструкциях за каждый бит ключа отвечает один нейрон, число нейронов может быть любым. То есть отечественные нейросетевые преобразователи биометрия-код могут работать с любыми криптографическими схемами защиты информации.

Классические коды с обнаружением и исправлением ошибок хорошо исследованы. По этой причине проектирование «нечетких экстракторов» является простой инженерной задачей. Иначе обстоит дело с нейросетевыми преобразователями биометрия-код. Искусственные нейронные сети плохо учатся, кроме того, до конца не известно, как их защищать, какова стойкость биометрико-нейросетевой защиты информации.

2. Создание технической спецификации, по криптографической защите таблиц обученных нейронных сетей

Для решения задачи обучения искусственных нейронных сетей в России разработан и введен в действие национальный стандарт ГОСТ Р 52633.5 [6]. После обучения нейросети каждый ее нейрон представляется двумя таблицами (таблицей входных связей нейрона и таблицей весовых коэффициентов этих связей). Эта ситуация отображена на рис. 2.

К сожалению, открыто размещать таблицы связей обученных нейронов в «облаках» Интернет нельзя. По этим данным можно восстановить код личного ключа пользователя и его биометрический образ.

Для защиты данных обученных нейронных сетей технический комитет по стандартизации № 026 «Криптографическая защита информации» в настоящее время разрабатывает и обсуждает техническую спецификацию [7].

Суть технической спецификации сводится к использованию вызова функций криптографического хэширования данных о состоянии нейронов вместо шифрования этих данных. Ранее было известно техническое решение по патенту RU2346397 [8], построенное на шифровании таблиц связей и таблиц весовых коэффициентов. Применение криптографических алгоритмов шифрования, например выполненных по ГОСТ Р 34.12 [9], усложняет программную реализацию. Практическая реализация средств криптографической защиты информации упрощается, если вместо полноценного шифрования используется вызов криптографической хэш-функции, выполненной по ГОСТ Р 34.11 [10].

Техническая спецификация [7] строится на том, что таблицы первого нейрона преобразователя биометрия-код накрыты гаммой Γ_1 , которая получается хэшированием пароля доступа:

$$\Gamma_1 = \text{hesh}(\text{"пароль"}). \quad (1)$$

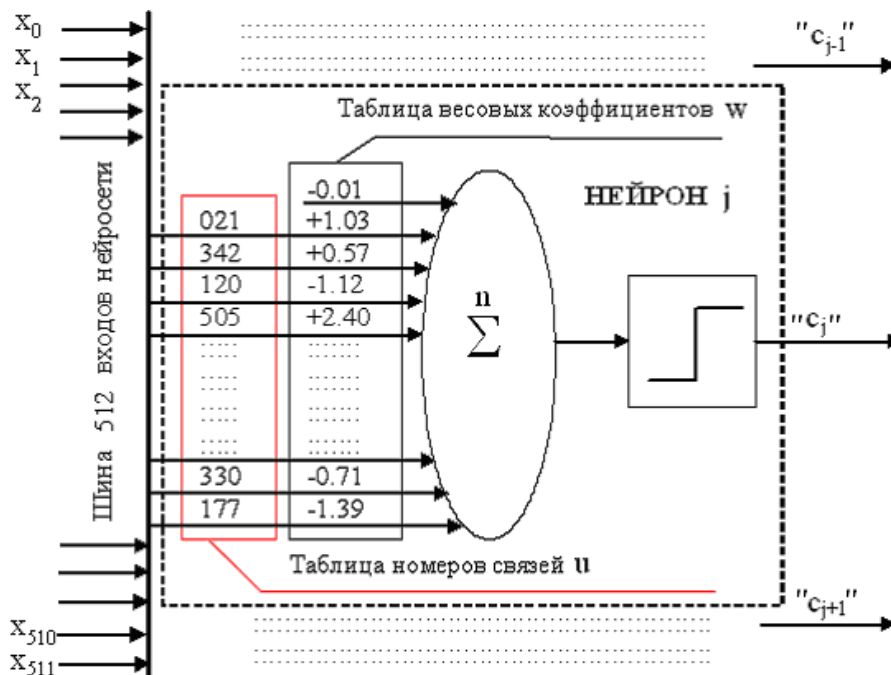


Рис. 2. Каждый нейрон преобразователя биометрия-код имеет собственную таблицу входных связей и собственную таблицу весовых коэффициентов

Таблицы связей второго нейрона накрываются гаммой, полученной хэшированием таблицы связей гаммы первого нейрона в конкатенации с выходным состоянием первого нейрона:

$$\Gamma_2 = \text{hesh}(\Gamma_1, c_1). \quad (2)$$

Получается рекурсивная схема, на каждом шаге которой следующая гамма зависит от предыдущей гаммы и состояния предшествующего нейрона:

$$\Gamma_k = \text{hesh}(\Gamma_{k-1}, c_{k-1}). \quad (3)$$

Таблицы связей и значения разрядов кода на выходах нейронов известны при обучении нейронной сети. По этой причине после обучения и назначения пароля доступа все гаммы для всех таблиц нейронов могут быть вычислены. После того как таблицы связей накрыты гаммами, получается защищенный нейросетевой контейнер, который может храниться с привлечением облачного сервиса.

При использовании защищенного контейнера пользователь набирает свой пароль доступа и предъявляет свой биометрический образ. Биометрический образ должен порождать на выходах нейросетевого преобразователя верный выходной код

$$\{c_1, c_2, c_3, \dots, c_{256}\}.$$

Появляется возможность повторно рекуррентно (3) восстановить все гаммы, которыми ранее были накрыты таблицы связей нейронов. Если возникает хотя бы одна ошибка в коде пароля доступа или в коде выходных состо-

яний нейронов, восстановить все гаммы нельзя. Возникает эффект размножения ошибок.

3. Тестирование качества криптографической защиты таблиц нейросетевого преобразователя

Известно, что стойкость кода биометрико-нейросетевого преобразования к атакам подбора много ниже, чем стойкость криптографического ключа такой же длины [11]. Более того, каждый биометрический преобразователь, обученный на свой биометрический образ, будет обладать своей стойкостью к атакам подбора. То есть после каждой процедуры обучения и каждой процедуры защиты данных таблиц нейронов необходимо выполнить процедуру тестирования.

Для тестирования следует заранее собрать базу образов «Чужой», например, состоящую из 10 000 образов. Далее пользователь должен ввести свой пароль и начать подставлять на входы защищенного преобразователя данные 10 000 образов «Чужой». При этом на выходе преобразователя появится 10 000 кодов. О стойкости защищенного нейросетевого преобразователя следует судить, анализируя младшие разряды кодов.

Проведенный численный эксперимент показал, что для рукописного образа «слово_01» база данных из 10 000 образов дает множество совпадений до 40 младших разрядов кода. Можно утверждать, что число попыток подбора, позволяющих найти часть ключа в 40 бит, составляет 10 000 образов «Чужой». Формальная запись этого утверждения:

$$П_{40} = 10\,000. \quad (4)$$

Ограниченный размер тестовой базы обусловлен высоким уровнем трудоемкости ее формирования, если придерживаться требований ГОСТ Р 52633.1 [12]. Для того чтобы увеличить размер тестовой базы, необходимо скрещивать пары образов-родителей по ГОСТ Р 52633.2 [13], получая образы-потомки. Примеры подобного скрещивания иллюстрируются рис. 3.

Увеличив размеры тестовой базы, например в 1000 раз, мы вновь можем проверить, сколько на этой базе удастся подобрать бит ключа. В случае, если будет обнаружен факт совпадения первых 44 бит, можно записать:

$$П_{44} = 10\,000\,000. \quad (5)$$

Очевидно, что постепенно увеличивая размеры тестовой базы, мы будем подбирать все больше и больше бит ключа. На рис. 4 приведена прямая, отражающая результаты подбора.

По результатам численного эксперимента получено время 0,47 с перебора первой базы естественных биометрических образов $П_{40}$. После того как было выполнено многократное размножение биометрических данных, удалось подобрать первых 64 бита ключа за время 6 мин 51 с.

При реализации численного эксперимента производился последовательный подбор 40, 42, 44, ..., 64 бит ключа с контролем размеров базы образов «Чужой» $П_{40}$, $П_{42}$, $П_{44}$, ..., $П_{64}$.

Как показано на рис. 4, промежуточные данные сливаются в одну прямую (утолщенная линия с углом наклона φ). Опираясь на результаты числен-

ного эксперимента, удастся предсказать размер базы тестовых образов «Чужой», необходимый для подбора 256 бит ключа. Необходимые расчеты описываются приведенной ниже системой из трех уравнений:

$$\begin{cases} \operatorname{tg}(\varphi) = \frac{\log_{10}(\Pi_{64}) - \log(\Pi_{40})}{64 - 40}, \\ D = \log_{10}(\Pi_{64}) + \operatorname{tg}(\varphi) \cdot (256 - 64), \\ \Pi_{256} \approx 10^D. \end{cases} \quad (6)$$

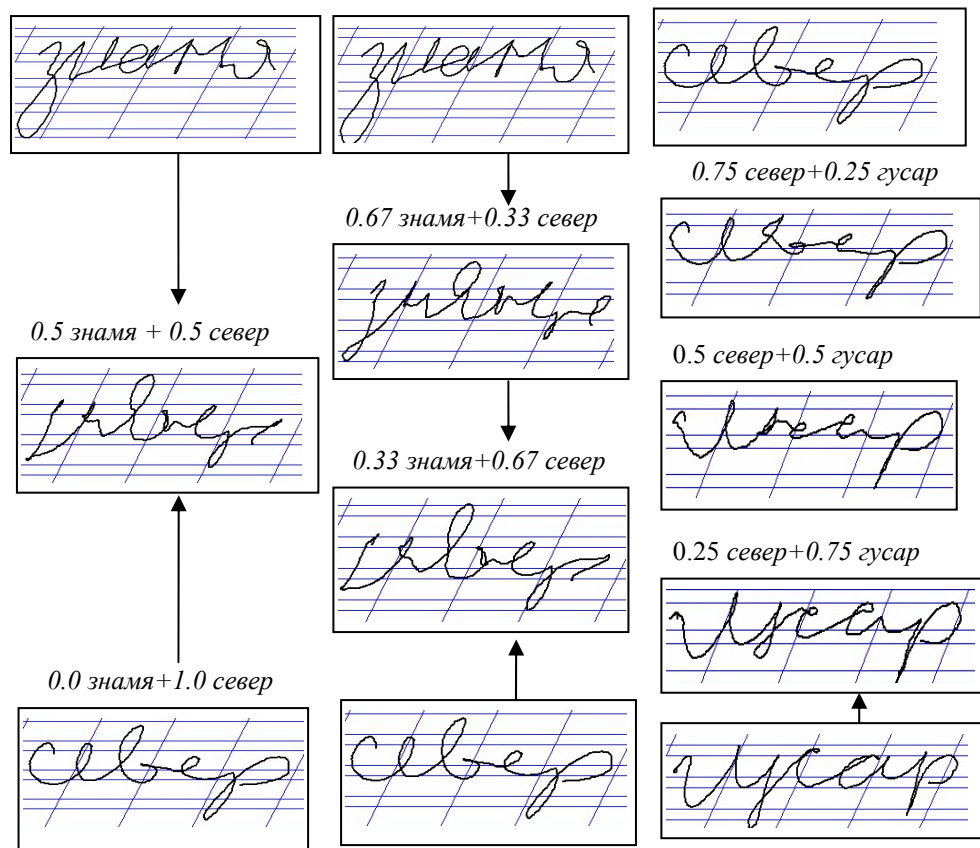


Рис. 3. Получение от образов-родителей 1, 2, 3 образов-потомков линейным морфингом по ГОСТ Р 52633.2

Из данных рис. 4 следует, что на подбор 256 бит ключа должно уйти 10^{11} с, что составит примерно 3 000 лет непрерывной работы обычной вычислительной машины, на которой проводился численный эксперимент. Нами использовалась вычислительная машина с процессором Intel core i5-2500 (3,3 ГГц) ОЗУ 4 Гб. При использовании компьютера большей мощности время на подбор сократится, однако оно остается достаточно большим для обычных настольных компьютеров. Размер базы образов «Чужой» инвариантен к мощности вычислительной машины.

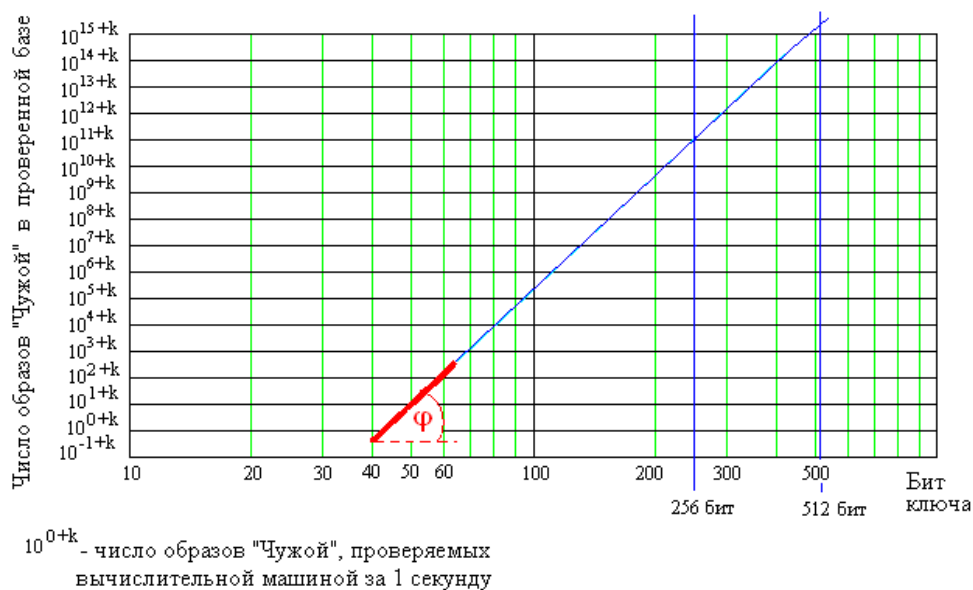


Рис. 4. Прогноз размеров тестовой базы образов «Чужой», необходимой для подбора 256 бит ключа на выходе нейросетевого преобразователя биометрия-код, обученного на биометрическом образе «slovo_01» (данные из приложения)

Заключение

Когда речь идет об обычной криптографии, для получения надежной защиты достаточно применить качественный криптографический ключ и проверить программное обеспечение. Ситуация меняется, когда речь идет о совместном использовании биометрии и криптографии. В этом случае мало реализовать правильно программный продукт в соответствии требованиями технической спецификации [7]. После каждого обучения нейронной сети и каждой процедуры защиты ее таблиц защищенный нейросетевой контейнер необходимо несколько минут тестировать описанным в данной статье алгоритмом. При этом наклон прямой в логарифмических координатах рис. 4 для каждого конкретного биометрического образа будет свой. Даже если криптографический ключ качественно изготовлен, функции криптографического хэширования корректно вызываются, защита может оказаться слабой из-за применения «слабого» биометрического образа. Слабость биометрико-криптографической защиты необходимо выявлять при тестировании и сообщать пользователю результат.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 52633.0–2006. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к средствам высоконадежной биометрической аутентификации. – М. : Стандартинформ, 2006. – 19 с.
2. Нейросетевая защита персональных биометрических данных / Ю. К. Язов, В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков, И. Г. Назаров ; под ред. Ю. К. Язова. – М. : Радиотехника, 2012. – 157 с.
3. Juels, A. A Fuzzy Commitment Scheme / A. Juels, M. Wattenberg // Proc. ACM Conf. Computer and Communications Security. – Singapore, 1999. – P. 28–36.

4. **Ramírez-Ruiz, J.** Cryptographic Keys Generation Using Finger Codes / J. Ramírez-Ruiz, C. Pfeiffer, J. Nolasco-Flores // *Advances in Artificial Intelligence – IBERAMIA-SBIA 2006 (LNCS 4140)*. – Ribeirão Preto, Brazil, 2006. – P. 178–187.
5. **НАО, F.** Crypto with Biometrics Effectively / Feng Hao, Ross Anderson, and John Daugman // *IEEE Transactions On Computers*. – 2006. – Vol. 55, № 9.
6. ГОСТ Р 52633.5–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа. – М. : Стандартинформ, 2011. – 20 с.
7. Техническая спецификация (проект, публичное обсуждение начато с 01.02.2017 членами ТК 26 «Криптографическая защита информации») ЗАЩИТА НЕЙРОСЕТЕВЫХ БИОМЕТРИЧЕСКИХ КОНТЕЙНЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ. – М. , 2017.
8. Пат. 2346397 Российская Федерация. Способ защиты персональных данных биометрической идентификации и аутентификации / Иванов А. И., Фунтиков В. А., Ефимов О. В. – заявл. 26.06.2007 ; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4.
9. ГОСТ Р 34.12–2015. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Режимы работы блочных шифров. – М. : Стандартинформ, 2015. – 21 с.
10. ГОСТ Р 34.11–2012. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Функция хэширования». – М. : Стандартинформ, 2012, 24 с.
11. ГОСТ Р 52633.3–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора. – М. : Стандартинформ, 2011. – 23 с.
12. ГОСТ Р 52633.1–2009. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию баз естественных биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации. – М. : Стандартинформ, 2009. – 25 с.
13. ГОСТ Р 52633.2–2010. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию синтетических биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации. – М. : Стандартинформ, 2011. – 22 с.

References

1. GOST R 52633.0–2006. *Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Trebovaniya k sredstvam vysokonadezhnoy biometricheskoy autentifikatsii* [Information protection. Information protection technique. Requirements to the means of high-reliability biometric authentication]. Moscow: Standartinform, 2006, 19 p.
2. Yazov Yu. K., Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Funtikov V. A., Nazarov I. G. *Neyrosetevaya zashchita personal'nykh biometricheskikh dannykh* [Neural network protection of personal biometric data]. Moscow: Radiotekhnika, 2012, 157 p.
3. Juels A., Wattenberg M. *Proc. ACM Conf. Computer and Communications Security*. Singapore, 1999, pp. 28–36.
4. Ramírez-Ruiz J., Pfeiffer C., Nolasco-Flores J. *Advances in Artificial Intelligence – IBERAMIA-SBIA 2006 (LNCS 4140)*. Ribeirão Preto, Brazil, 2006, pp. 178–187.
5. Hao F., Anderson R., Daugman J. *IEEE Transactions On Computers*. 2006, vol. 55, no. 9.
6. GOST R 52633.5–2011. *Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Avtomaticheskoe obuchenie neyrosetevykh preobrazovateley biometriya-kod dostupa* [Information protection. Information protection technique. Automatic training of neural network biometrics-access code converters]. Moscow: Standartinform, 2011, 20 p.
7. *Tekhnicheskaya spetsifikatsiya (proekt, publichnoe obsuzhdenie nachato s 01.02.2017 chlenami TK 26 «Kriptograficheskaya zashchita informatsii») ZASHchITA NEY-*

- ROSETEVYKh BIOMETRICHESKIKh KONTEYNEROV S ISPOL'ZOVANIEM KRIPTOGRAFICHESKIKh ALGORITMOV [Technical specification (draft, public discussion initiated on 01.02.2017 by members of TC 26 "Cryptographic protection of information"). Protection of neural network biometric containers using cryptographic algorithms]. Moscow, 2017.
8. Pat. 2346397 Russian Federation. *Sposob zashchity personal'nykh dannykh biometricheskoy identifikatsii i autentifikatsii* [A method of protection of personal data on biometric identification and authentication]. Ivanov A. I., Funtikov V. A., Efimov O. V. appl. 26.06.2007, publ. 10.02.2009, bull. no. 4.
 9. GOST P 34.12–2015. *Informatsionnaya tekhnologiya. Kriptograficheskaya zashchita informatsii. Rezhimy raboty blochnykh shifrov* [Information technology. Cryptographic protection of information. Operating modes of block cyphers]. Moscow: Standartinform, 2015, 21 p.
 10. GOST R 34.11–2012. *Informatsionnaya tekhnologiya. Kriptograficheskaya zashchita informatsii. Funktsiya kheshirovaniya* [Information technology. Cryptographic protection of information. Hashing function]. Moscow: Standartinform, 2012, 24 p.
 11. GOST R 52633.3–2011. *Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Testirovanie stoykosti sredstv vysokonadezhnoy biometricheskoy zashchity k atakam podbora* [Information protection. Information protection technique. Testing of resistance of the means of high-reliability biometric protection to picking attacks]. Moscow: Standartinform, 2011, 23 p.
 12. GOST R 52633.1–2009. *Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Trebovaniya k formirovaniyu baz estestvennykh biometricheskikh obrazov, prednaznachennykh dlya testirovaniya sredstv vysokonadezhnoy biometricheskoy autentifikatsii* [Information protection. Information protection technique. Requirements to the formation of bases of natural biometric images intended for testing of the means of high-reliability biometric authentication]. Moscow: Standartinform, 2009, 25 p.
 13. GOST R 52633.2–2010. *Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Trebovaniya k formirovaniyu sinteticheskikh biometricheskikh obrazov, prednaznachennykh dlya testirovaniya sredstv vysokonadezhnoy biometricheskoy autentifikatsii*. [Information protection. Information protection technique. Requirements to the formation of synthetic biometric images intended for testing of the means of high-reliability biometric authentication]. Moscow: Standartinform, 2011, 22 p.

Майоров Александр Викторович

специалист, Пензенский
научно-исследовательский
электротехнический институт (Россия,
г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: pniei@penza.ru

Mayorov Aleksandr Viktorovich

Specialist, Penza Research Institute
of Electrical Engineering (9 Sovetskaya
street, Penza, Russia)

Сомкин Сергей Александрович

специалист, Пензенский
научно-исследовательский
электротехнический институт (Россия,
г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: pniei@penza.ru

Somkin Sergey Aleksandrovich

Specialist, Penza Research Institute
of Electrical Engineering (9 Sovetskaya
street, Penza, Russia)

Юнин Алексей Петрович

специалист, Пензенский
научно-исследовательский
электротехнический институт (Россия,
г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: pniei@penza.ru

Yunin Aleksey Petrovich

Specialist, Penza Research Institute
of Electrical Engineering (9 Sovetskaya
street, Penza, Russia)

Акмаев Артур Жиганшеевич

специалист, Пензенский
научно-исследовательский
электротехнический институт (Россия,
г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: pniei@penza.ru

Akmaev Artur Zhigansheevich

Specialist, Penza Research Institute
of Electrical Engineering (9 Sovetskaya
street, Penza, Russia)

УДК 519.2, 004.622, 004.056.53

Майоров, А. В.

Оценка стойкости защищенных нейросетевых преобразователей биометрия-код с использованием больших баз синтетических биометрических образов / А. В. Майоров, С. А. Сомкин, А. П. Юнин, А. Ж. Акмаев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 4 (48). – С. 65–74. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-4-6.

Д. Е. Чикрин, А. А. Егорчев,
С. В. Голоусов, П. А. Савинков, Д. Н. Тумаков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕФЛЕКСИВНЫХ ГРАФОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ ПУТИ И ТАКТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ КОЛЕСНОЙ ПЛАТФОРМОЙ

Аннотация.

Актуальность и цели. Рассмотрена задача упрощенного автопилота – разработка системы управления, решающей задачи планирования пути и тактического (в реальном времени) управления колесной платформой при решении класса целевых задач по проезду заданного в виде ключевых точек маршрута.

Материалы и методы. Планирование пути и принятие решений по тактическому управлению осуществляются на базе динамического рефлексивного графа, формируемого с использованием триангуляции Делоне по объектам дорожной сцены с дальнейшей их трансляцией диаграммой Вороного.

Результаты. Сформированы граничные условия для тестовой площадки, имитирующей условия заводской территории/автостоянки. Определены критерии безопасности выполнения маневров в условиях существования как статических, так и подвижных объектов в рамках анализируемой дорожной сцены.

Выводы. Проведенный ряд модельных экспериментов для тестовых площадок различной конфигурации показал эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: автопилот, система управления, динамический граф, колесная платформа, триангуляция Делоне, диаграмма Вороного.

D. E. Chikrin, A. A. Egorchev,
S. V. Golousov, P. A. Savinkov, D. N. Tumakov

USAGE OF DYNAMIC REFLEXIVE GRAPHS IN PATH PLANNING AND TACTICAL CONTROL OF A ROBOTIC WHEEL PLATFORM

Abstract.

Background. This paper considers a simplified autopilot problem - the development of a control system that solves the problems of path planning and tactical (real time) wheel platform control when solving a class of target tasks for driving a route specified as key points.

Materials and methods. Path planning and decision making of the presented strategy are based regarding tactical control on a dynamic reflexive graph, formed by Delaunay triangulation of road scene objects with its further translation by Voronoi diagram.

© Чикрин Д. Е., Егорчев А. А., Голоусов С. В., Савинков П. А., Тумаков Д. Н., 2018. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Results. Boundary conditions of the testing area, imitating conditions of a manufacturing plant/parking lot are shown. Safety criteria of performing maneuvers with both static and dynamic obstacles at the analyzed road scene are determined.

Conclusions. Series of model experiments for different test sites were made, showing effectiveness of proposed method.

Keywords: autopilot, control system, dynamic graph, wheel platform, Delaunay triangulation, Voronoi diagram.

Введение

На сегодня одно из самых актуальных и быстроразвивающихся направлений автоматизации – это автопилот для наземных транспортных средств (ТС). Важно разделять применяемые методы построения автопилотов при жестко заданных граничных условиях, например, при специализированном применении на закрытых заводских территориях и применении в условиях движения в городе автопилот будет концептуально отличаться в силу разных наборов сенсорики, дорожной обстановки, а также назначения транспортного средства.

Рассматривая существующие системы автопилотирования для наземных транспортных средств, в первую очередь стоит отметить область применения и основные цели использования данной системы. Первые наработки (разрабатывались еще с начала 1960-х гг. такими компаниями, как *GM*, *MEL*, *Mercedes-Benz*) были направлены на создание автономного ТС для повышения безопасности движения по высокоскоростным шоссе [1], включали в себя функции движения по полосе, смены полосы, а также следование за автомобилем. Говоря о современных разработках, стоит отметить значительный прогресс систем автопилотирования непосредственно в городской среде. Одним из наиболее значимых проектов является «*Waymo*», который направлен на снижение дорожно-транспортных происшествий, а также повышение безопасности непосредственно самого транспортного средства во время движения [2]. В настоящей работе уделяется внимание решению задач автопилотирования для внутривозовских территорий, подземных и закрытых площадок. Существует множество примеров автоматизированных ТС для решения подобных задач, в частности, для подземных территорий [3], портов [4], ферм [5] и т.д. Одним из минусов представленных решений является то, что данные транспортные средства движутся по заранее известному маршруту и не решают задач планирования и построения пути в соответствии с присутствующими статическими объектами.

Основные отличительные признаки представленного метода связаны с решением задач построения пути для осуществления логистических перевозок промышленных парков открытой местности с различными сценариями использования.

Задача планирования движения заключается в нахождении траектории динамической системы при заданных граничных условиях и ограничениях. Более детальное планирование движения должно учитывать динамические уравнения системы, но иногда достаточно использовать лишь кинематическое описание системы для построения движения [6]. Более того, иногда динамическое состояние системы может быть получено лишь в процессе самого движения. Таким образом, методы построения движения можно разделить на

явные, в том случае когда движение может быть спланировано до начала движения, и неявные, в том случае, когда некоторые элементы состояния системы могут быть посчитаны непосредственно в движении.

Неявные методы построения движения, как правило, используют обратную связь. В простейшем случае вычисляется разница между текущим состоянием системы и желаемым состоянием и затем используется для движения системы в сторону уменьшения этой разности. Существует множество разновидностей подобных методов. Одним из наиболее эффективных является метод потенциалов [7].

Альтернатива неявным методам – явные методы, для работы которых необходимо знать полную конфигурацию пространства до начала движения. Как правило, такие методы используют только кинематику движения системы [8].

Для решения задачи построения траектории по заранее известной карте на сегодня используются такие методы, как *Visibility Graph* [9] (граф видимости), *roadmap* (дорожная карта), *cell decomposition*, диаграмма Вороного [10].

Граф видимости позволяет строить оптимальные маршруты между любыми точками карты благодаря предварительному расчету траекторий между угловыми точками препятствий [11]. Особенность использования графа видимости заключается в том, что полученные траектории проходят в непосредственной близости от препятствий, что не всегда бывает безопасно. Проблема может быть решена виртуальным «раздуванием» препятствий для создания безопасной зоны вокруг них [9].

Используемая в данной работе диаграмма Вороного представляет собой карту путей максимально удаленных от границ препятствий. В некоторых случаях применяют полноценную диаграмму Вороного [12], однако для уменьшения вычислений этот метод нередко упрощают, совмещая с другими методами планирования траекторий [13].

1. Постановка задачи

Представленная модель будет предназначена для решения задач внутривоздушных перевозок, что, в свою очередь, накладывает некоторые граничные условия и ограничения целевой площадки. Характерными чертами такой территории являются низкоскоростной режим движения, ограниченная площадь территории, наличие статических объектов в виде зданий, корпусов, цехов, а также наличие пешеходных зон. Таким образом, данная территория описывается двумерной картой местности с указанием допустимых и запрещенных мест для проезда (рис. 1). Карта представляет собой план индустриального парка с введенными статическими объектами в виде глобальных координат их границ. Для повышения безопасности объезда статических препятствий вводится дополнительная буферная зона, размеры которой должны быть установлены согласно прилегающей территории и габаритам транспортного средства.

Основные целевые задачи автопилота заключаются в том, чтобы обеспечить безопасный проезд от одной контрольной точки к другой. В контрольных точках подразумевается остановка транспортного средства с целью погрузки/разгрузки ТС либо окончания маршрута. На протяжении всего

маршрута транспортное средство должно соблюдать определенные меры безопасности:

- скоростной режим, установленный на территории;
- правила дорожного движения;
- безопасное прохождение всего маршрута с точки зрения устойчивости ТС на дорожной сцене;
- применение аварийной остановки в случае возникновения нештатных ситуаций.



Рис. 1. Пример отображения карты местности со статическими объектами и буферной зоной

Помимо указанных на карте статических объектов, во время движения транспортного средства могут возникать непредвиденные, заранее неизвестные ситуации, заключающиеся в появлении динамических объектов, таких как пешеходы, автомобили и др. В связи с этим должны быть введены требования по адаптации решения по расчету маршрута в зависимости от расстояния до данных объектов.

2. Система управления упрощенного автопилота

Для осуществления планирования пути транспортного средства большинством авторов традиционно используется теория графов. В основном в качестве вершин графа выбираются промежуточные точки, которые транспортное средство должно достигнуть, в качестве ребер – траектории маршрута ТС [14–16]. В данной работе для нахождения вершин графа используется триангуляция Делоне, которая позволяет найти «кандидаты» промежуточных точек, наиболее удаленные от препятствий. Метод триангуляции Делоне состоит в разбиении множества точек на тройки такие, что окружность, проведенная через эти точки, не содержит других точек. Особенность применения метода триангуляции в данной работе состоит в том, что в качестве множества точек берутся крайние точки препятствий и границы карты. На следующем шаге к полученной триангуляции берется двойственная диаграмма Во-

роного, центры которой являются множеством промежуточных точек предполагаемого маршрута. Стоит отметить, что данные центры будут наиболее удалены от статических препятствий.

Как было сказано ранее, карта местности представляется в виде крайних точек статических объектов и границ карты. Дискретность описания границ полностью отражается на количестве вершин графа. Чем большим количеством точек описываются объекты, тем больше вершин в графе (рис. 2). Каждая вершина будет иметь свою координату на локальной карте. При задании целевых действий транспортному средству подразумевается, что имеются начальная (позиция ТС) и конечная (контрольная) точки, которые добавляются к существующему списку вершин графа.

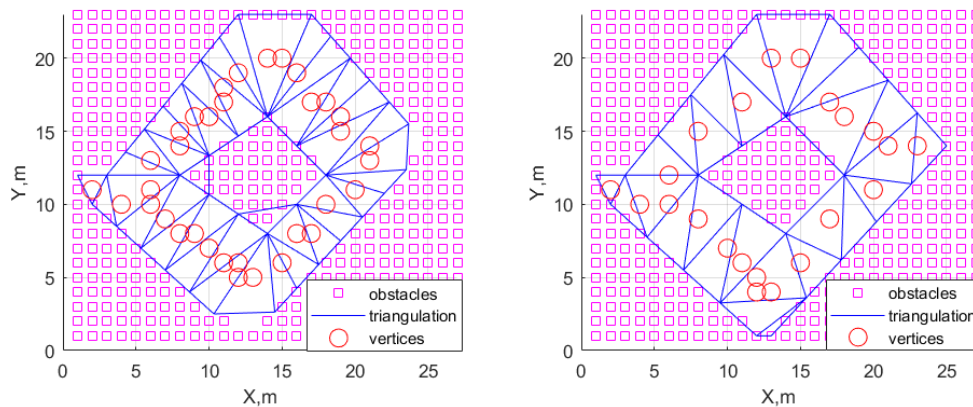


Рис. 2. Локальная карта местности с различным количеством вершин графа

Ребрами соединяются те и только те вершины, которые являются наблюдаемыми друг из друга. В качестве весов этих ребер берутся расстояния между вершинами графа. Представленный граф является рефлексивным ввиду того, что каждая из вершин графа передает информацию по скорости и углу поворота колес транспортному средству.

Для построения маршрута транспортного средства из одной точки в другую на основании полученного графа применяется алгоритм поиска пути Дейкстры, который обеспечивает оптимальный с точки зрения расстояния маршрут (рис. 3).

Согласно условиям эксплуатации разрабатываемого автопилота была выбрана кинематическая модель транспортного средства. Существует множество типов представления колесных платформ транспортных средств, которые можно разделить на две основные составляющие:

- 1) модель для описания движения ТС в высокоскоростном режиме (полная);
- 2) модель для низкоскоростного эксплуатирования (упрощенная).

Полные модели, как правило, используются для обеспечения устойчивого движения ТС в особо сложных условиях эксплуатации (высокая скорость, плохие дорожные условия) [17] с учетом различных нелинейных характеристик ТС. В данной статье представлена упрощенная модель в условиях низкоскоростного режима движения, построенная согласно существую-

щим требованиям внутризаводских перевозок (рис. 4). Подобные аналоги были использованы при моделировании ТС в [8, 18], где основными характеристиками являлись направление ТС (ψ), скорость (v), угол поворота рулевого колеса (δ), радиус поворота (R), база автомобиля (L), передняя и задняя колея (l_f , l_r соответственно).

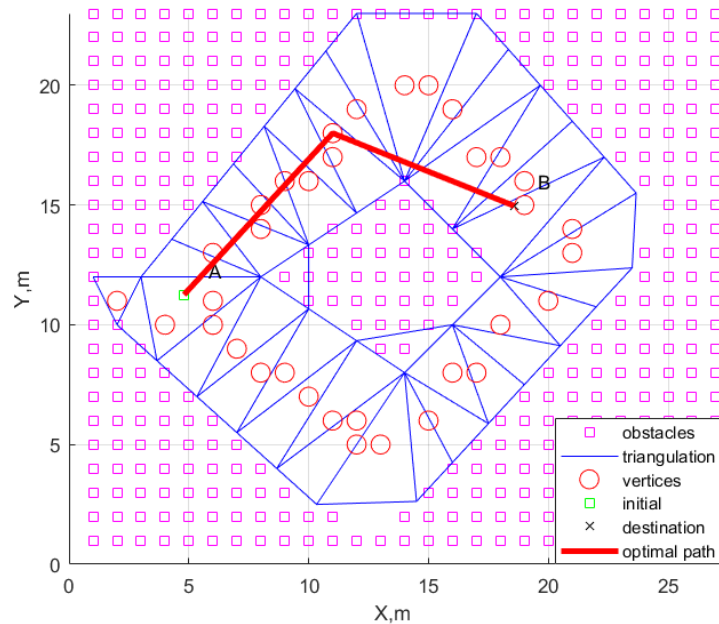


Рис. 3. Построение оптимального маршрута алгоритмом Дейкстры:
А – начальная точка; В – конечная точка

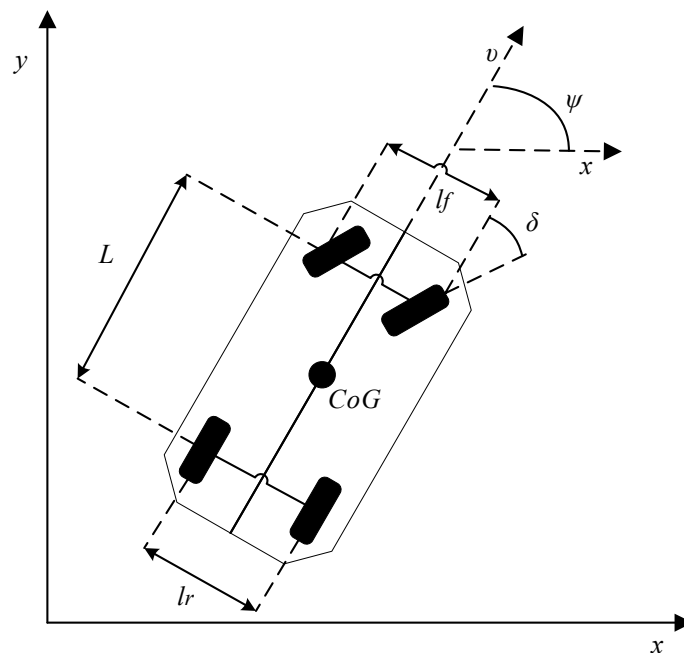


Рис. 4. Упрощенная кинематическая схема ТС

Для решения поставленной задачи был разработан алгоритм работы системы управления автопилотом. Как видно из структурной схемы, представленной на рис. 5, алгоритм обеспечивает работу системы вплоть до достижения пункта назначения (контрольной точки). В самом начале каждой итерации цикла производится сбор данных о местоположении ТС, чтобы обозначить положение ТС на локальной карте. Также используется анализ текущей обстановки вокруг ТС с помощью системы сенсорики. Все обнаруженные объекты вносятся на карту. Стоит отметить, что объекты вносятся на карту с соответствующей буферной зоной (дополнительное увеличение пространства вокруг объекта с целью повышения безопасности маневра обгона ТС). Далее, если граф не построен, применяется алгоритм построения графа и траектории движения ТС, производится проверка наличия динамических объектов на пути ТС. Если объект находится на траектории движения ТС, то проверяется следующее условие:

- 1) если расстояние до объекта позволяет перестроить траекторию и объехать объект, то происходит сброс траектории;
- 2) если расстояние до объекта критическое, то ТС останавливается.

3. Модельные эксперименты

Для верификации и оптимизации системы автопилотирования были проведены соответствующие испытания.

Представленные испытания воспроизводились на роботизированной колесной малогабаритной платформе (МГП), которая является масштабируемой копией грузового транспортного средства (в том числе по количеству осей и расположению привода). Параметры МГП (рис. 6):

- колесная база 1,52 м;
- привод задний (количество осей – 2);
- маркировка шин R12 235/30;
- передняя и задняя колея 1 м;
- масса без снаряжения (сухая) 150 кг.

Для достоверной работы системы пилотирования выбранные тесты должны включать:

- 1) проезд по нескольким контрольным точкам с преодолением статических препятствий;
- 2) выполнение целевого маршрута с заранее неизвестными динамическими препятствиями;
- 3) совмещение выполнения маршрута обгона статических препятствий и наличие на пути динамических объектов.

Дополняя вышеперечисленные требования к испытанию автопилота, стоит отметить, что для достоверной оценки работы системы желательно использовать вариацию площадок для тестирования (полигон).

В данной статье приведены результаты испытаний представленного автопилота на двух различных площадках. Первая площадка представляет собой полигон размером 35×50 м, вторая площадка прямоугольного типа с соответствующими размерами 90×120 м.

На рис. 7 представлен результат проезда по трем контрольным точкам на первой целевой площадке с обгоном двух статических препятствий. Как видно из рисунка, транспортное средство относительно точно следовало построенному маршруту, останавливаясь в контрольных точках.

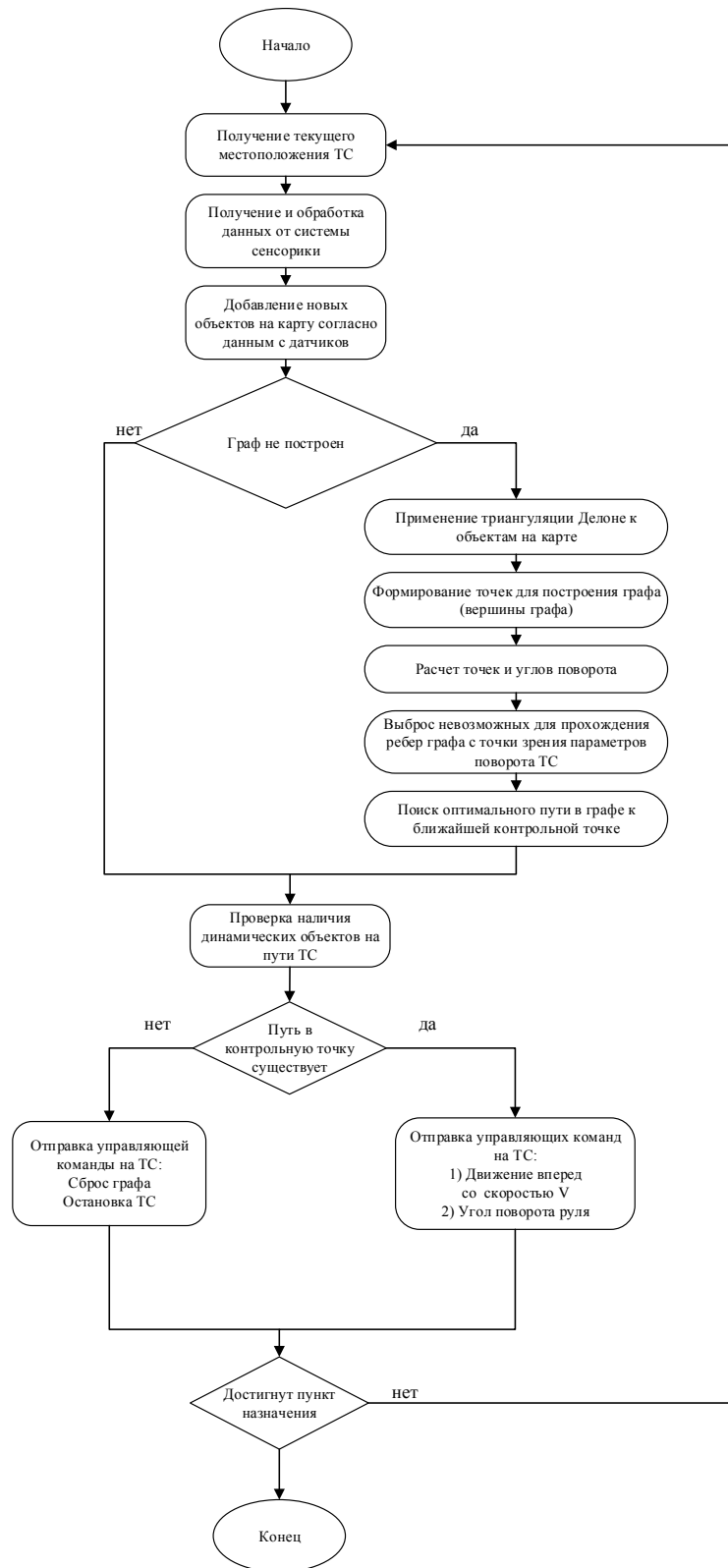


Рис. 5. Мастер-цикл системы управления автопилотом



Рис. 6. Роботизированная малогабаритная платформа

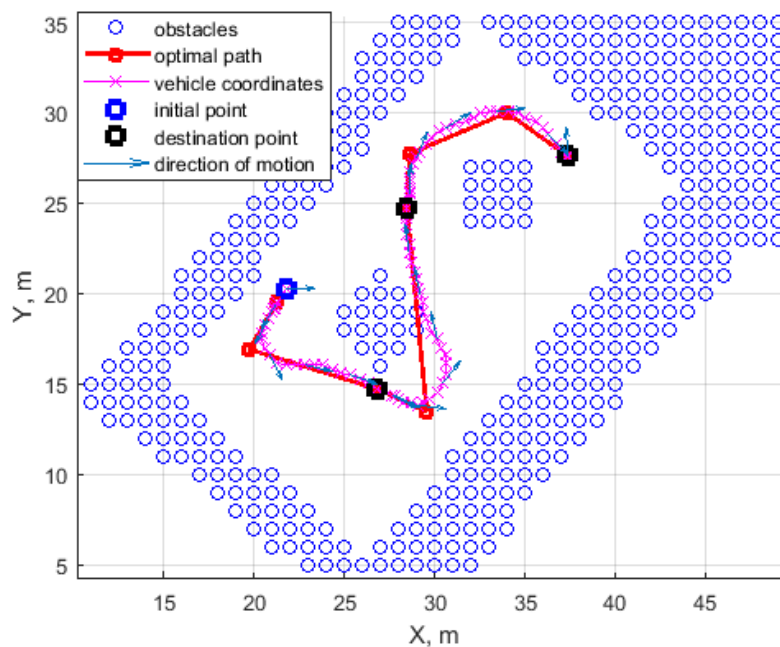


Рис. 7. Проезд по трем контрольным точкам с обиганием статических препятствий

На рис. 8 отображен проезд автоматизированного транспортного средства в контрольную точку с выходом на пути заранее неизвестного динамического препятствия в виде человека на первой целевой площадке. Соответственно, как было указано в алгоритме управления системы, динамический объект был обнаружен заблаговременно, что позволяло ТС перестроить маршрут, безопасно обигая данное препятствие.

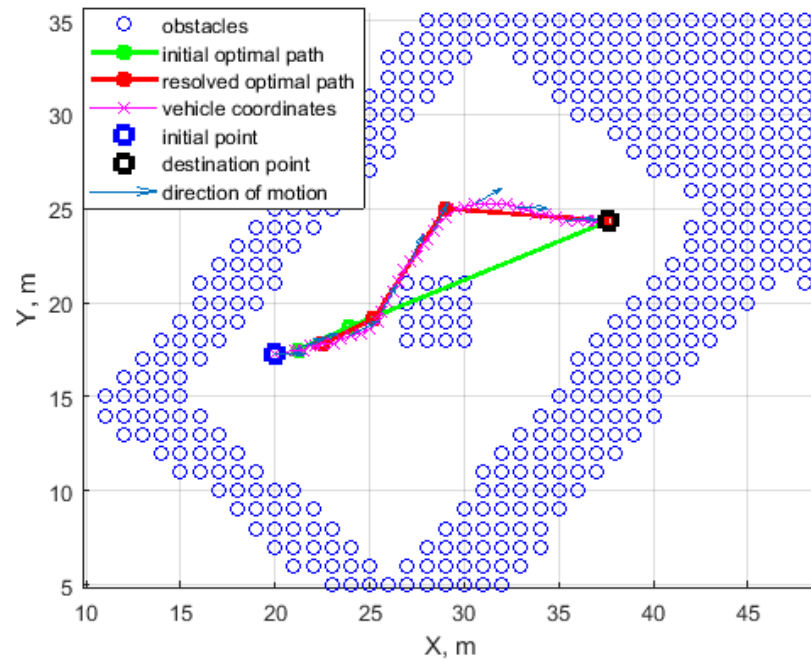


Рис. 8. Проезд в контрольную точку с обнаружением динамического объекта

На рис. 9 показан итоговый маршрут автопилота на второй площадке с наличием на карте соответствующих статических и динамических препятствий.

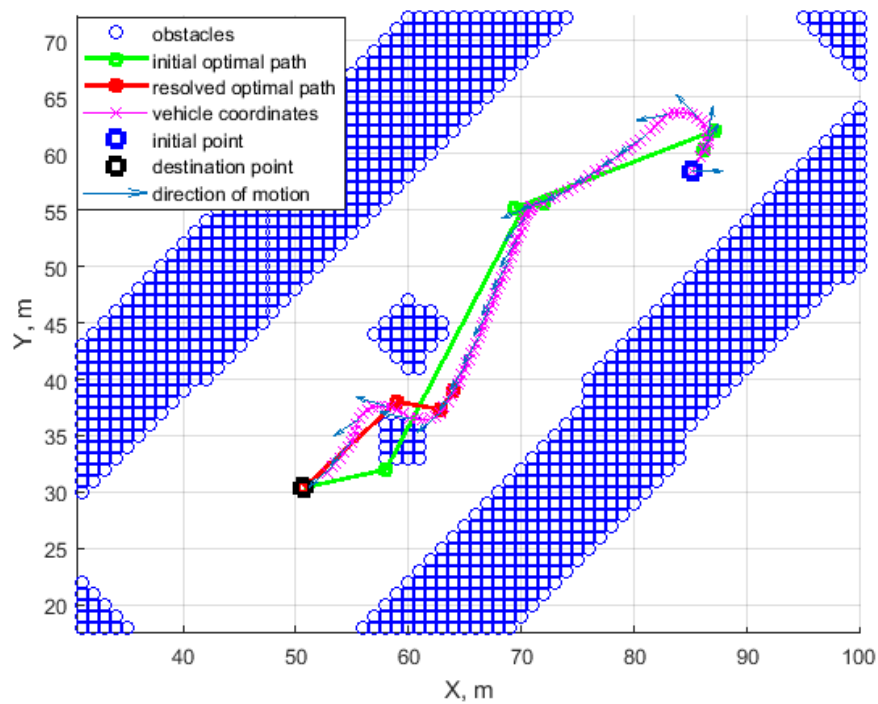


Рис. 9. Проезд по контрольным точкам с наличием динамических препятствий

Заключение

В данной работе представлен метод решения задачи построения пути для автопилотирования транспортного средства. С учетом анализа особенностей целевой площадки сформированы критерии безопасности поведения транспортного средства на внутривозвездской территории. Представлен алгоритм системы управления, который будет более детально описан в последующих работах авторов. Отличительной особенностью исследования является то, что планирование маршрута и принятие решений по управлению транспортным средством осуществляются на базе динамического рефлексивного графа, который формируется посредством триангуляции Делоне по объектам дорожной сцены с дальнейшей их трансляцией диаграммой Вороного. Проведены соответствующие модельные эксперименты на двух различных площадках, которые показали достоверность и эффективность работы предложенного метода.

Библиографический список

1. **Özgüner, U.** Autonomous ground vehicles / U. Özgüner. – Massachusetts : Artech House, 2011. – 280 p.
2. **Litman, T.** Autonomous Vehicle Implementation Predictions / T. Litman // Implications for Transport Planning. – 2018. – P. 32
3. **Ridley, P.** Autonomous Control of an Underground Mining Vehicle / P. Ridley, P. Corke // Aust. Conf. Robot. Autom. – United States : Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2001. – P. 26–31.
4. **Pradalier, C.** Vision-based operations of a large industrial vehicle: Autonomous hot metal carrier / C. Pradalier, A. Tews, J. Roberts // J. F. Robot. – 2008. – Vol. 25, № 4–5. – P. 243–267.
5. Automatic steering of farm vehicles using GPS / T. Bell, G. Elkaim, D. B. Parkinson, M. O'Connor, T. Bell, G. Elkaim, B. Parkinson // Prec. Agric. – 1996. – № precisionAgricu 3. – P. 767–777.
6. **Eindhoven, T. U.** Obstacle Avoidance for Wheeled Mobile Robotic Systems (Literature Exploration) / T. U. Eindhoven // Neural Networks. – 2003. – P. 10.
7. **Shin, W.** Line Segment Selection Method for Fast Path Planning / W. Shin, J. Shin, B. Kim, K. Jeong // International Journal of Control, Automation and Systems. – 2017. – Vol. 15, № 3. – P. 1322–1331.
8. **Ailon, A.** On controllability and trajectory tracking of a kinematic vehicle model / A. Ailon, N. Berman, S. Arogeti // Automatica. – 2005. – Vol. 41, № 5. – P. 889–896.
9. **Huang, Han-Pang** Dynamic visibility graph for path planning / Han-Pang Huang, Shu-Yun Chung // 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566). – 2004. – Vol. 3. – P. 2813–2818.
10. **Magid, E.** Voronoi-based trajectory optimization for UGV path planning / E. Magid, R. Lavrenov, I. Afanasyev // International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC). – 2017. – № 1. – P. 383–387.
11. **Rohnert, H.** Shortest paths in the plane with convex polygonal obstacles / H. Rohnert // Inf. Process. Lett. – 1986. – Vol. 23, № 2. – P. 71–76.
12. **Choset, H.** Sensor-Based Exploration: The Hierarchical Generalized Voronoi Graph / H. Choset, J. Burdick // Int. J. Rob. Res. – 2000. – Vol. 19, № 2. – P. 96–125.
13. **Lopez Garcia, D. A.** Vodec: A fast Voronoi algorithm for car-like robot path planning in dynamic scenarios / D. A. Lopez Garcia, F. Gomez-Bravo // Robotica. – 2012. – Vol. 30, № 7. – P. 1189–1201.
14. Data association for mobile robot navigation: a graph theoretic approach / T. Bailey, E. M. Nebot, J. K. Rosenblatt, H. F. Durrant-Whyte // Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Sympo-

- sia Proceedings (Cat. No. 00CH37065) / ed. D. A. Lopez Garcia and F. Gomez-Bravo. – Sydney, Australia, 2000. – Vol. 3. – P. 2512–2517.
15. **Tan, G.** Global optimal path planning for mobile robot based on improved Dijkstra algorithm and ant system algorithm / G. Tan, H. He, S. Aaron // *J. Cent. South Univ. Technol.* – 2006. – Vol. 13, № 1. – P. 80–86.
16. **Geiger, A.** Probabilistic models for 3D urban scene understanding from movable platforms / A. Geiger // *Probabilistic Model. 3D Urban Scene Underst. from Movable Platforms.* – 2013. – April. – P. 1–162.
17. **Smith, D. E.** Effects of Model Complexity on the Performance of Automated Vehicle Steering Controllers: Model Development, Validation and Comparison / D. E. Smith, J. M. Starkey // *Veh. Syst. Dyn.* – 1995. – Vol. 24, № 2. – P. 163–181.
18. **Pepy, R.** Path Planning using a Dynamic Vehicle Model / R. Pepy, A. Lambert, H. Mounier // *2nd International Conference on Information & Communication Technologies.* – 2006. – Vol. 1, № 1. – P. 781–786.

References

1. Özgüner U. *Autonomous ground vehicles*. Massachusetts: Artech House, 2011, 280 p.
2. Litman T. *Implications for Transport Planning*. 2018, p. 32
3. Ridley P., Corke P. *Aust. Conf. Robot. Autom.* United States: Piscataway, New Jersey: IEEE Service Center, 2001, pp. 26–31.
4. Pradalier C., Tews A., Roberts J. J. F. *Robot.* 2008, vol. 25, no. 4–5, pp. 243–267.
5. Bell T., Elkaim G., Parkinson D. B., O'Connor M., Bell T., Elkaim G., Parkinson B. *Precis. Agric.* 1996, no. precision Agric 3, pp. 767–777.
6. Eindhoven T. U. *Neural Networks*. 2003, p. 10.
7. Shin W., Shin J., Kim B., Jeong K. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 1322–1331.
8. Ailon A., Berman N., Arogeti S. *Automatica*. 2005, vol. 41, no. 5, pp. 889–896.
9. Huang Han-Pang, Chung Shu-Yun *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)*. 2004, vol. 3, pp. 2813–2818.
10. Magid E., Lavrenov R., Afanasyev I. *2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC)*. 2017, no. 1, pp. 383–387.
11. Rohnert H. *Inf. Process. Lett.* 1986, vol. 23, no. 2, pp. 71–76.
12. Choset H., Burdick J. *Int. J. Rob. Res.* 2000, vol. 19, no. 2, pp. 96–125.
13. Lopez Garcia, D. A., Gomez-Bravo F. *Robotica*. 2012, vol. 30, no. 7, pp. 1189–1201.
14. Bailey T., Nebot E. M., Rosenblatt J. K., Durrant-Whyte H. F. *Proceedings 2000 ICRA. Millen-nium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065)*. Sydney, Australia, 2000, vol. 3, pp. 2512–2517.
15. Tan G., He H., Aaron S. *J. Cent. South Univ. Technol.* 2006, vol. 13, no. 1, pp. 80–86.
16. Geiger A. *Probabilistic Model. 3D Urban Scene Underst. from Movable Platforms*. 2013, April, pp. 1–162.
17. Smith D. E., Starkey J. M. *Veh. Syst. Dyn.* 1995, vol. 24, no. 2, pp. 163–181.
18. Pepy R., Lambert A., Mounier H. *2006 2nd International Conference on Information & Communication Technologies*. 2006, vol. 1, no. 1, pp. 781–786.

Чикрин Дмитрий Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиофизики, Казанский
федеральный университет (Россия,
г. Казань, ул. Кремлевская, 18)

E-mail: Dmitry.kfu@gmail.com

Chikrin Dmitriy Evgen'evich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of radiophysics,
Kazan Federal University
(18 Kremlyovskaya street, Kazan, Russia)

Егорчев Антон Александрович

младший научный сотрудник, Институт физики, Казанский федеральный университет (Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18)

E-mail: eanton090@gmail.com

Egorchev Anton Aleksandrovich

Research assistant, Institute of Physics, Kazan Federal University
(18 Kremlyovskaya street, Kazan, Russia)

Голоусов Святослав Владимирович

младший научный сотрудник, Институт физики, Казанский федеральный университет (Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18)

E-mail: sgolousov@gmail.com

Golousov Svyatoslav Vladimirovich

Research assistant, Institute of Physics, Kazan Federal University
(18 Kremlyovskaya street, Kazan, Russia)

Савинков Павел Андреевич

младший научный сотрудник, Институт физики, Казанский федеральный университет (Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18)

E-mail: savinkov001@mail.ru

Savinkov Pavel Andreevich

Research assistant, Institute of Physics, Kazan Federal University
(18 Kremlyovskaya street, Kazan, Russia)

Тумаков Дмитрий Николаевич

кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра прикладной математики, Казанский федеральный университет (Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18)

E-mail: dtumakov@kpfu.ru

Tumakov Dmitriy Nikolaevich

Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, sub-department of applied mathematics, Kazan Federal University
(18 Kremlyovskaya street, Kazan, Russia)

УДК 007.52

Использование динамических рефлексивных графов при решении задач планирования пути и тактического управления роботизированной колесной платформой / Д. Е. Чикрин, А. А. Егорчев, С. В. Голоусов, П. А. Савинков, Д. Н. Тумаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 4 (48). – С. 75–87. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-4-7.

Э. В. Зябиров, А. В. Аравин,
С. В. Михайлов, И. П. Филюшкин

ВЫБОР ВИДА И ПАРАМЕТРОВ СТРОБОВ ПРИ ОТОЖДЕСТВЛЕНИИ КООРДИНАТНОЙ ИНФОРМАЦИИ ОТ СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ В КОМПЛЕКСЕ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ БАТАРЕЙНОГО КОМАНДНОГО ПУНКТА

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования является комплекс средств автоматизации (КСА) батарейного командного пункта. Предметом исследования являются методы и средства обработки информации от средств разведки в КСА батарейного командного пункта. Цель работы – сопоставление и анализ форм корреляционного строба, разработка эффективного, оптимального алгоритма обнаружения в стробах эллиптической формы.

Материалы и методы. Исследования методов и средств обработки информации от средств разведки в КСА батарейного командного пункта были выполнены на основе теории статистических решений.

Результаты. Рассмотрен процесс формирования строба захвата при завязке траектории воздушной цели. Проанализированы две формы корреляционных стробов: эллиптический и прямоугольный. Разработан эффективный и оптимальный алгоритм обнаружения отметок в стробах эллиптической формы.

Выводы. Впервые предложены условия формирования адаптивного эллиптического корреляционного строба отождествления на основе расчета СКО, критериев отождествления и приоритета источника. Разработан адаптивный алгоритм обработки и комплексирования данных воздушной разведки, отличающийся от известных использованием эллиптического корреляционного строба отождествления. Результаты работы целесообразно заложить в основу программного обеспечения подсистемы управления противовоздушной обороной сухопутных войск для повышения точности выдачи целеуказания и уменьшения вероятности пропуска цели в сложной динамической обстановке.

Ключевые слова: обнаружение целей, отождествление, пункт управления, радиолокационная информация, система разведки, эллиптический строб, мера близости.

E. V. Zyabirov, A. V. Aravin,
S. V. Mikhaylov, I. P. Filyushkin

THE CHOICE OF THE FORM AND PARAMETERS OF STROBES AT THE IDENTIFICATION OF COORDINATE INFORMATION FROM AIR TARGET SENSORS IN A COMPLEX OF AUTOMATION EQUIPMENT OF A BATTERY COMMAND POST

Abstract.

Background. The research object is a complex of automation equipment of a battery command post. The research object is the methods and means of information

processing from devices of investigation in the complex of automation equipment of a battery command post. The work purpose is to compare and analyze forms of a correlation strobe, to develop an effective, optimal algorithm of detection in strobes of an elliptic form.

Materials and methods. Researches of methods and means of information processing from devices of investigation in the complex of automation equipment of a battery command post were executed on the basis of the theory of statistical decisions.

Results. The process of formation of the capture strobe when setting up the trajectory of an air target is considered. Two forms of correlation strobes are analyzed: elliptical and rectangular. An efficient and optimal algorithm for detecting marks in elliptical gates has been developed.

Conclusions. For the first time, the conditions for the formation of an adaptive elliptic correlation identification strobe based on the calculation of the standard deviation, identification criteria and source priority are proposed. An adaptive algorithm for processing and integrating aerial reconnaissance data has been developed, which differs from the known ones using an elliptical correlation identification strobe. The results of the work are advisable to lay into the foundation for the ground forces air defense control subsystem software to increase the accuracy of target designation and reduce the probability of missing a target in a complex dynamic environment.

Keywords: target detection, identification, control point, radar information, intelligence system, elliptical strobe, proximity measure.

Своевременное обеспечение командных пунктов и пунктов управления информацией, необходимой для управления зенитными средствами при отражении ударов средств воздушного нападения противника, является основной задачей для систем радиолокационной разведки. К источникам информации в батарейных командных пунктах (БКП) относятся все сопрягаемые объекты, независимо от их подчиненности, передающие информацию о воздушной обстановке, и собственные (встроенные) средства разведки воздушного противника.

К внешним источникам информации относятся:

- вышестоящие командные пункты и взаимодействующие командные пункты;
- межвидовой авиационный комплекс радиолокационного дозора и наведения;
- вертолетные комплексы радиолокационного дозора;
- радиолокационные станции (РЛС);
- взаимодействующие БКП;
- станции обнаружения целей боевых машин.

К собственным источникам информации относятся:

- РЛС;
- средства радиотехнической разведки (СРТР);
- оптико-электронные системы (ОЭС).

Основу системы разведки воздушного противника составляет радиолокационная разведка. Активная радиолокационная разведка обеспечивает обнаружение целей с необходимой точностью и дальностью в любых погодных условиях и в любое время суток, но легко обнаруживается СРТР противника.

Для повышения полноты, качества и устойчивости информационного обеспечения возникает необходимость применения пассивных средств разведки наряду с активными РЛС.

Комплексирование информации от всех этих видов разведки компенсирует их отдельные недостатки и позволяет создать систему разведки воздушных целей, обеспечивающую достаточную скрытность ведения разведки, полноту и устойчивость информации о воздушной обстановке [1–3].

Основными источниками развединформации в БКП являются собственные средства (РЛС, СРТР, ОЭС), а информация от внешних источников их дополняет по результатам отождествления. Из собственных средств разведки наибольшей полнотой информации обладает информация от РЛС (полные координаты, скорости изменения координат, признак государственной принадлежности, признак класса цели). Поэтому собственная РЛС является главным источником развединформации, а информация от СРТР и ОЭС должна использоваться в качестве дополняющей.

Сбор и обработка информации о воздушной обстановке в БКП предполагают решение следующих задач:

- первичная обработка радиолокационной информации (РЛИ) от аналоговых РЛС, обеспечивающая определение координат целей относительно местоположения источника и передачу данных на вторичную обработку;
- вторичная обработка РЛИ (от аналоговых РЛС, прошедшая первичную обработку, и цифровых РЛС без трассового выхода), обеспечивающая автоматическую завязку и автосопровождение траекторий воздушных объектов [4];
- третичная обработка, обеспечивающая отождествление информации, поступающей от различных источников разведки.

Основной операцией при третичной обработке развединформации, определяющей качество работы БКП как разведывательно-информационной системы, является операция отождествления. Качество выполнения операций отождествления (вероятность правильного отождествления) существенным образом зависит от выбора вида и параметров строба отождествления [5].

Под корреляционным стробом понимается область пространства, центр которой совмещен с экстраполированными координатами цели на определенном цикле обзора РЛС. Форма и размеры строба выбираются таким образом, чтобы действительные результаты измерений (если отметка обнаружена) с высокой вероятностью находились в пределах строба, и в то же время число мешающих отметок было ограниченным. Процесс привязки отметок к траекториям, основанный на сопоставлении отметок и известных траекторий, имеющих близкие координаты, рассмотрен в [6].

Первичное обнаружение воздушных целей производится в полярной системе координат по формулам [7]:

$$\begin{aligned}x_{\text{отм}} &= D \cos \beta; \\ y_{\text{отм}} &= D \sin \beta,\end{aligned}\tag{1}$$

где $x_{\text{отм}}$, $y_{\text{отм}}$ – координаты отметки по осям x , y ; D – наклонная дальность до цели; азимутальный угол β отсчитывается от оси x .

Задача вторичной обработки радиолокационной информации – захват и сопровождение трасс воздушных целей – решается в декартовой системе координат. Соотношения выглядят следующим образом:

$$D = \sqrt{x_{\text{отм}}^2 + y_{\text{отм}}^2};$$

$$\beta = \alpha, \text{ при } \Delta x \geq 0 \text{ и } \Delta y > 0 \text{ или } \Delta x > 0 \text{ и } \Delta y \geq 0;$$

$$\beta = 180^\circ - \alpha, \text{ при } \Delta x < 0 \text{ и } \Delta y \geq 0;$$

$$\beta = 180^\circ + \alpha, \text{ при } \Delta x < 0 \text{ и } \Delta y < 0;$$

$$\beta = 360^\circ - \alpha, \text{ при } \Delta x \geq 0 \text{ и } \Delta y < 0; \quad (2)$$

$$\alpha = \arctg \left| \frac{\Delta y}{\Delta x} \right|,$$

где $\Delta x = x_{\text{отм}} - x_{\text{т ст}}$, $\Delta y = y_{\text{отм}} - y_{\text{т ст}}$, где $x_{\text{т ст}}$, $y_{\text{т ст}}$ – координаты собственной точки стояния.

Эллиптический строб (рис. 1) описывается каноническим уравнением эллипса (3) и матрицей поворота (4):

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1;$$

$$a = K_\beta D \text{tg} \sigma_\beta, \quad b = K_D \sigma_D, \quad (3)$$

где σ_β – среднеквадратическая ошибка измерения азимута; σ_D – среднеквадратическая ошибка измерения дальности; K_D , K_β – коэффициенты, которые подбираются на основе математического моделирования и изменяются при изменении признаков маневра в формуляре цели. Параметры σ_β , σ_D являются фиксированными:

$$\begin{pmatrix} \cos \beta & \pm \sin \beta \\ \pm \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \cos \beta - y \sin \beta \\ x \sin \beta + y \cos \beta \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Конкретные знаки в формулах зависят от того, является система координат правосторонней или левосторонней и выполняется вращение по или против часовой стрелки. Верхний знак используется при выборе правосторонней системы координат и положительном направлении вращения против часовой стрелки. Тот же знак верен для левосторонней системы координат при выборе положительного вращения по часовой стрелке. В оставшихся двух случаях используется нижний знак. После преобразований получаем уравнение эллиптического строба (5), результаты построения которого представлены на рис. 2:

$$\left(\frac{x \cos \beta - y \sin \beta}{a}\right)^2 + \left(\frac{x \sin \beta + y \cos \beta}{b}\right)^2 = 1. \quad (5)$$

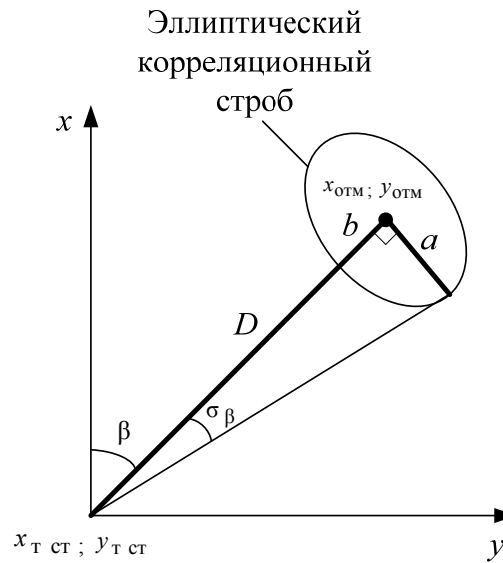


Рис. 1. Эллиптический корреляционный строб в прямоугольных координатах

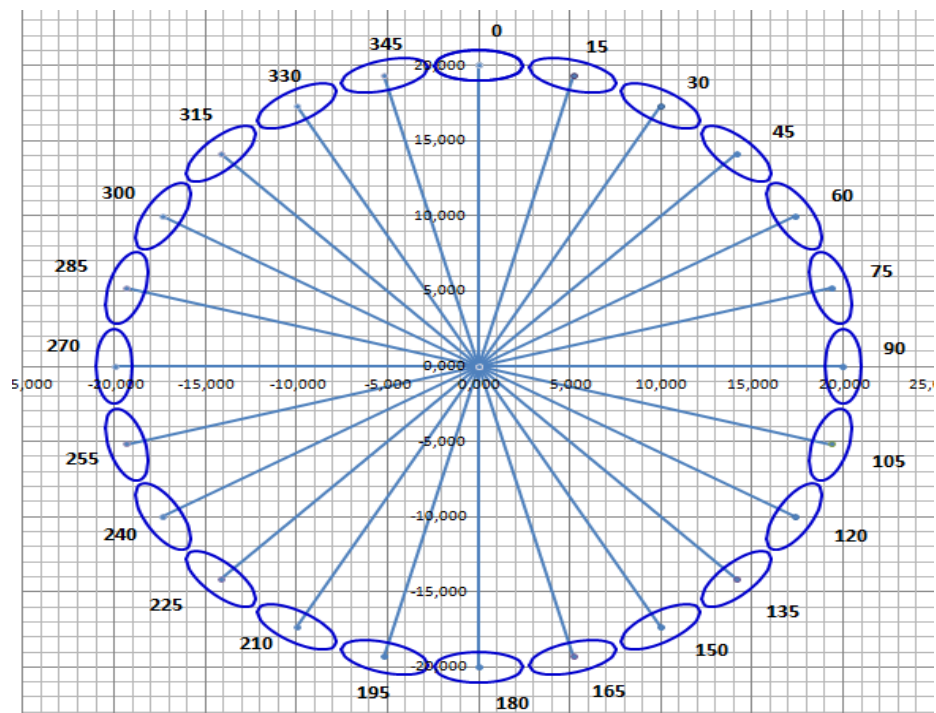


Рис. 2. Эллиптический строб с изменением по азимуту

Далее происходит ограничение числа отметок, которые могут быть использованы для обновления траектории. Это достигается рассмотрением только тех отметок, которые попали в корреляционный строб определенных размеров, построенный в точке с экстраполированными координатами цели. Условие проверки попадания отметки в эллиптический строб выглядит следующим образом:

$$\left(\frac{(x_{\text{отм}} - x_{\text{экс}}) \cdot \cos \beta - (y_{\text{отм}} - y_{\text{экс}}) \cdot \sin \beta}{a} \right)^2 + \left(\frac{(x_{\text{отм}} - x_{\text{экс}}) \cdot \sin \beta + (y_{\text{отм}} - y_{\text{экс}}) \cdot \cos \beta}{b} \right)^2 \leq 1, \quad (6)$$

где $x_{\text{отм}}$, $y_{\text{отм}}$, $x_{\text{экс}}$, $y_{\text{экс}}$ – координаты цели и центра строба соответственно.

После этого формируется матрица расстояний, в результате чего снимается неопределенность и отбираются пары с наибольшей корреляцией. Расстояние отметки до центра строба определяется с помощью меры близости, вычисляемой по формуле

$$R(i) = \sqrt{(x_{\text{отм}}(i) - x_{\text{экс}})^2 + (y_{\text{отм}}(i) - y_{\text{экс}})^2}, \quad (7)$$

где $R(i)$ – расстояние от отметки i до центра строба.

Каждая траектория предварительно привязывается к ближайшей отметке, после чего предварительные привязки проверяются в целях устранения отметок, использованных более одного раза. При альтернативном подходе (в случае только одной связи с траекторией) отметка всегда привязывается к траектории. Неопределенность, как и прежде, устраняется с помощью меры близости.

В целях сокращения вычислительных затрат эллиптическая форма строба иногда заменяется прямоугольной. Однако это приводит к увеличению вероятности попадания в строб ложных отметок или отметок, принадлежащих разным траекториям, на различных азимутах, и, следовательно, к ухудшению селективирующей и разрешающей способности операции стробирования. На сегодня вычислительные мощности машин позволяют использовать эллиптические стробы при решении задач первичной и вторичной обработки радиолокационной информации.

Таким образом, предложенные выше условия формирования адаптивного эллиптического корреляционного строба отождествления на основе расчета СКО, критериев отождествления и приоритета источника, а также адаптивный алгоритм обработки и комплексирования данных воздушной разведки целесообразно заложить в основу программного обеспечения подсистемы управления противовоздушной обороной сухопутных войск. Предложенные решения позволят в большей степени автоматизировать процесс обработки данных воздушных целей, повысить точность выдачи целеуказаний на объекты управления, уменьшить нагрузку на оператора, тем самым сократить время принятия решения по цели и уменьшить вероятность пропуска цели в сложной динамической обстановке.

Библиографический список

1. **Островой, С. В.** Структурно-логическая последовательность объединения информации о воздушной обстановке в АСУ ПВО СВ ТЗ / С. В. Островой // Вестник войсковой ПВО. – 2014. – № 11. – С. 177.
2. **Коренко, Э. В.** Способ вторичной обработки информации по данным активного и пассивного источника / Э. В. Коренко // Вестник войсковой ПВО. – 2014. – № 10. – С. 93.

3. **Филюшкин, И. П.** Совершенствование разведывательно-информационного обеспечения пунктов управления ПВО тактического звена / И. П. Филюшкин, А. В. Аравин, Э. В. Зябиров // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Системы отображения информации и управления спецтехникой (СОИУ). – М. : Электроника, 2015. – Вып. 2. – С. 66.
4. **Кузьмин, С. З.** Цифровая радиолокация / С. З. Кузьмин. – М. : Радио и связь, 2000. – 428 с.
5. **Кузьмин, С. З.** Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации / С. З. Кузьмин. – М. : Сов. радио, 1974. – 433 с.
6. **Студер, Ф. А.** Цифровая обработка радиолокационной информации / Ф. А. Студер, А. Фарина. – М. : Радио и связь, 1993. – 320 с.
7. **Выгодский, М. Я.** Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1993. – 991 с.

References

1. Ostrovoy S. V. *Vestnik voyskovoy PVO* [Bulletin of military air defense]. 2014, no. 11, p. 177.
2. Korenko E. V. *Vestnik voyskovoy PVO* [Bulletin of military air defense]. 2014, no. 10, p. 93.
3. Filyushkin I. P., Aravin A. V., Zyabirov E. V. *Voprosy radioelektroniki. Ser.: Sistemy otobrazheniya informatsii i upravleniya spetsstekhnikoy (SOIU)* [Issues of radio electronics. Series: Systems of information display and special equipment control]. Moscow: Elektronika, 2015, iss. 2, p. 66.
4. Kuz'min S. Z. *Tsifrovaya radiolokatsiya* [Digital radio location]. Moscow: Radio i svyaz', 2000, 428 p.
5. Kuz'min S. Z. *Osnovy teorii tsifrovoy obrabotki radiolokatsionnoy informatsii* [Fundamentals of the theory of digital processing of radar information]. Moscow: Sov. radio, 1974, 433 p.
6. Studer F. A., Farina A. *Tsifrovaya obrabotka radiolokatsionnoy informatsii* [Digital processing of radar information]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 320 p.
7. Vygodskiy M. Ya. *Spravochnik po vysshey matematike* [Higher mathematics handbook]. Moscow: Gos. izd-vo fiz.-mat. lit., 1993, 991 p.

Зябиров Эльдар Витальевич

инженер-электроник, отдел 09270,
Научно-производственное
предприятие «Рубин» (Россия,
г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: add.zyabirov@gmail.com

Zyabirov El'dar Vital'evich

Electronic engineer, department 09270,
Research and Production Enterprise
“Rubin” (2 Baydukova street,
Penza, Russia)

Аравин Артем Владимирович

заместитель начальника отдела 09270,
Научно-производственное предприятие
«Рубин» (Россия, г. Пенза,
ул. Байдукова, 2)

E-mail: a.v.aravin@yandex.ru

Aravin Artem Vladimirovich

Deputy head of department 09270,
Research and Production Enterprise
“Rubin” (2 Baydukova street,
Penza, Russia)

Михайлов Сергей Владимирович
инженер-электроник, отдел 09270,
Научно-производственное
предприятие «Рубин» (Россия,
г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: smikhaylov987@mail.ru

Mikhaylov Sergey Vladimirovich
Electronic engineer, department 09270,
Research and Production Enterprise
“Rubin” (2 Baydukova street,
Penza, Russia)

Филюшкин Иван Павлович
кандидат технических наук, доцент,
начальник отдела 09270, Научно-
производственное предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: a.v.aravin@yandex.ru

Filyushkin Ivan Pavlovich
Candidate of engineering sciences, associate
professor, head of department 09270,
Research and Production Enterprise “Rubin”
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

УДК 621.396.967

Зябиров, Э. В.

Выбор вида и параметров стробов при отождествлении координатной информации от средств обнаружения воздушных целей в комплексе средств автоматизации батарейного командного пункта / Э. В. Зябиров, А. В. Аравин, С. В. Михайлов, И. П. Филюшкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 4 (48). – С. 88–95. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-4-8.

БИОИНСПИРИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ САМОРАЗРАБОТКИ ПРОГРАММ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ

Аннотация.

Дан сравнительный анализ современных биоинспирированных технологий разработки программного обеспечения, способных обеспечить саморазработку программ для распределенных компьютерных систем. Установлено, что парадигмы мультиагентного и неравновесного программирования являются наиболее подходящими концепциями для создания саморазрабатываемых и самопрограммируемых программных систем, подходящих для реализации вездесущих и всепроникающих вычислений, а также Интернета вещей.

Ключевые слова: программная инженерия, распределенные вычислительные системы, саморазработка, самопрограммирование, парадигма неравновесного программирования, искусственная жизнь, искусственная химия.

Е. А. Kol'chugina

BIOINSPIRED METHODS OF SOFTWARE SELF-DEVELOPMENT FOR DISTRIBUTED COMPUTER SYSTEMS

Abstract.

We give a comparative analysis of modern bioinspired software design technologies capable of providing self-development of software for distributed computer systems. It is established that multiagent and non-equilibrium programming paradigms are the most proper concepts for designing of self-developing and self-programming software systems suitable to implement ubiquitous and pervasive computations and Internet of Things.

Keywords: software engineering, distributed computer systems, self-development, self-programming, non-equilibrium programming paradigm, artificial life, artificial chemistry.

Введение

Повсеместное использование глобальных компьютерных и телекоммуникационных сетей делает необходимым применение параллельных и распределенных вычислений. Это влечет необходимость создания новых методов организации соответствующих вычислений и методов разработки программ, реализующих данные вычисления.

Влияние таких факторов, как пространственная распределенность вычислений, многокомпонентность и относительная независимость компонентов программного обеспечения, приводит к усложнению структуры и логики функционирования программ. К этому следует добавить, что программы,

функционирующие на базе распределенных систем, взаимодействуют с вычислительным окружением, формирующимся в результате функционирования других подобных программ и их взаимодействия с системным программно-аппаратным обеспечением. В итоге традиционные методы разработки программ с жесткой логикой поведения и отсутствием способностей к адаптации к изменяющимся условиям вычислительного окружения становятся неэффективными с точки зрения решения задачи создания программного обеспечения распределенных систем, предназначенного для долговременной эксплуатации.

Желательными свойствами программного обеспечения, предназначенного для использования на основе распределенных вычислительных систем с учетом непредсказуемо изменяющихся условий эксплуатации, являются способности к самооптимизации, самовосстановлению, самоменеджменту и продолжающейся саморазработке, т.е. к саморазвитию в течение всего жизненного цикла.

Способности к саморазвитию в наиболее выраженной степени присущи живым организмам и их сообществам различного уровня сложности. Попытки провести аналогии между вычислительными и биологическими (или биохимическими) процессами привели к формированию концепций биоинспирированных вычислений. Преимущества и недостатки применения данных концепций для разработки программного обеспечения распределенных систем будут рассмотрены далее.

1. Методы разработки программ на основе эволюционных вычислений

Концептуальную основу эволюционных вычислений составляют методы направленного перебора закодированных вариантов решений, восходящие еще к работам Л. Фогеля, А. Оуэнса и М. Уолша [1]. Наиболее ярким примером эволюционных вычислений являются генетические алгоритмы, впервые предложенные Дж. Холландом в 1975 г. [2–4].

В классической модели генетического алгоритма множество решений, называемых хромосомами, кодируется в виде строк. Для получения нового поколения решений над строками выполняются операции кроссинговера, или получения хромосом-потомков путем перекрестного обмена фрагментами между хромосомами-предками, и мутации, или случайной замены значения в выбранной позиции строки. Затем на основе значения фитнес-функции, оценивающей соответствие решения требуемому критерию, с помощью оператора селекции формируется новое поколение хромосом.

Очевидно, что если удастся представить программу для ЭВМ как решение, закодированное линейной последовательностью или строкой, то для получения улучшенных решений, т.е. лучших вариантов программы, могут быть применены методы генетических алгоритмов. Подобное кодирование естественно для программ на ассемблероподобных языках программирования, где программа представляется линейной последовательностью команд. Такой подход нашел применение в μ -исчислении [5].

Недостатки данного подхода:

- высокая вероятность получения вырожденных неработоспособных решений;

- ограничение возможности использования структур данных, если они более сложны, чем регистровые переменные;

- в целях обеспечения безопасности вычислений рассмотренный подход допустимо использовать исключительно в условиях виртуальной ЭВМ с применением псевдоассемблерных языков, отличных от системы команд реально используемого физического процессора.

Другой подход к эволюционной разработке программ, известный как генетическое программирование [3, 6], был предложен Дж. Ко́за. Этот подход, также возникший на основе генетических алгоритмов, но более популярный, безопасный и практически значимый, чем эволюционная разработка программ на ассемблероподобных языках, основан на использовании древо-видных хромосом. Каждая такая хромосома представляет собой выражение λ -подобного исчисления, которому соответствует программа на языке функционального программирования, сходного с *LISP*. Операции кроссинговера и мутации реализуются соответственно как обмен поддеревьями или перестройка поддерева. Генетическое программирование хорошо зарекомендовало себя с точки зрения решения практически значимых задач. Оно свободно от выделенных ранее ограничений, характерных для моделей эволюционирующих ассемблерных программ. Однако генетическое программирование имеет свой недостаток в виде невозможности контролировать высоту получаемого решения. Кроме того, с точки зрения обеспечения эволюционной непрерывной саморазработки программ хромосомы генетического программирования нуждаются в однозначно заданном критерии приспособленности, что делает неэффективным применение данного подхода в непредсказуемо изменяющихся условиях, когда критерии приспособленности могут изменяться.

2. ДНК-вычисления

Из всех рассматриваемых здесь подходов ДНК-вычисления являются наиболее концептуально близкими к биологии, так как они реализуются путем выполнения химических реакций над фрагментами молекулы ДНК, кодирующими решения и их фрагменты. Первичная структура молекулы ДНК представляет собой линейную последовательность аминокислот, т.е. кодовую строку. Наследственная информация, хранящаяся в ДНК, кодируется в алфавите, состоящем из четырех аминокислот, образующих две пары, связанные отношением комплиментарности. Это можно рассматривать как разновидность двоичного алфавита $\{0, 1, \bar{0}, \bar{1}\}$ [7]. Допустимые операции над ДНК включают в себя соединение отдельных фрагментов благодаря свойству комплиментарности и наличию «липких» концов, а также разрезание фрагментов ДНК, отделение фрагментов, обладающих заданными свойствами, слияние и копирование множеств фрагментов.

Как показано в [8], ДНК-вычисления можно применить для проектирования баз данных. Применение ДНК-вычислений для разработки программ допустимо в том случае, когда программа может быть представлена в виде линейной структуры и может быть явно и однозначно задан критерий отбора решений. Это накладывает ограничения на применение данного метода. Помимо этого, реализация ДНК-вычислений трудоемка и ресурсоемка.

3. Мультиагентные системы

Мультиагентный подход, известный с середины 1990-х гг., быстро нашел применение при разработке систем искусственного интеллекта и моделей искусственной жизни, демонстрирующих эмерджентное поведение и наличие процессов самоорганизации.

Здесь можно выделить:

- подходы, основанные на применении интеллектуальных агентов, производящих логический вывод на знаниях [9];

- подходы, основанные на применении обучающихся агентов, обладающих сенсорами и нейросетью, эволюционирующей благодаря обучению [10–12];

- подходы, основанные на применении простейших агентов, не обладающих сенсорами и нейросетью и реализующих жестко заданный набор правил [12, 13].

Особый интерес представляют подходы второй и третьей групп, так как именно для соответствующих им моделей отмечено возникновение индивидуальных стратегий поведения у агентов, обеспечивающих выживание в модельной среде, а также формирование коллективного поведения, в результате чего агенты начинают действовать как разумное интеллектуальное целое. И в том и в другом случае агенты непрерывно эволюционируют, приспосабливаясь к среде, при этом либо совершенствуя нейросеть через обучение, либо вырабатывая оптимальную последовательность выполнения простейших действий. Эти возможности удовлетворяют сформулированному выше для программного обеспечения распределенных систем требованию необходимости учета текущего состояния актуальной вычислительной среды и адаптации к этому состоянию. В силу этих причин мультиагентные системы находят все более широкое применение на практике.

Однако мультиагентные системы обладают недостатком, ограничивающим их возможности: в ходе эволюции изменяются только управляющие параметры и данные агентов, сама структура и общий алгоритм поведения агентов не изменяются. Таким образом, разработчик мультиагентной системы должен предвидеть и сразу учесть все возможные функции, которые может понадобиться реализовать агентам для решения основной задачи и обеспечения функционирования самой мультиагентной системы, что затруднительно сделать.

4. Неравновесное программирование

Парадигма неравновесного программирования была предложена в работах Е. А. Кольчугиной, в том числе в [14]. Данная парадигма сочетает в себе черты как мультиагентного подхода, так и эволюционной разработки программ на ассемблероподобных языках с помощью генетических алгоритмов. Основная отличительная особенность парадигмы неравновесного программирования состоит в том, что она позволяет разрабатывать программные системы, в которых наблюдается самоорганизация континуального типа.

Программная система, построенная в соответствии с парадигмой неравновесного программирования, представляет собой сообщество цифровых организмов, являющихся программными агентами с открытой архитектурой.

Каждый такой цифровой организм представляет собой динамически изменяющуюся, как качественно, так и количественно, совокупность функций. Наличие некоторых функций обязательно, другие являются опционными. Если реализации функций могут изменяться с течением времени, то семантика и интерфейсы функций фиксированы. Связь реализаций функций с интерфейсом и семантикой кодируется при помощи числовой последовательности, или цифровой ДНК. Это позволяет, с одной стороны, изменять цифровой организм, причем как значения управляющих параметров, так и алгоритм поведения, но, с другой стороны, делает процесс изменений подконтрольным и управляемым, позволяя исключить нежелательные пути развития популяции программ. Над цифровой ДНК могут быть выполнены все операции генетических алгоритмов. Таким образом, открываются широкие возможности для эволюционного получения наилучших программных решений. Как и в случае эволюционирующих программ на ассемблероподобных языках, эволюция цифровых организмов должна происходить в условиях специальным образом устроенной изолированной среды, подобной виртуальной ЭВМ, в целях обеспечения безопасности процесса эволюции для базовой компьютерной системы.

Свое название парадигма неравновесного программирования получила благодаря положенной в ее основу идее сходства вычислительных процессов с химическими и термодинамическими процессами. В большинстве случаев просматривается аналогия между выполнением программ, стремящихся к вычислению конечного результата и останову, с процессами, стремящимися к термодинамическому равновесию. Эта аналогия становится более очевидной, если рассматривать процессорное время как аналог доступной энергии. В случае процессов, стремящихся к равновесию, энергия расходуется и рассеивается. Однако процессы самоорганизации, реализующие неравновесное упорядочение [15], стремятся к удалению от термодинамического равновесия через совершение полезной работы. В качестве модельного аналога такой работы можно рассматривать выполнение программой вычислений, значимых для пользователя. Если выполнение таких вычислений будет поощряться увеличением количества доступного процессорного времени, выступающего в качестве аналога свободной энергии, то выполнение программы в целом может рассматриваться как процесс, ход которого направлен против модельного аналога термодинамического равновесия, т.е. останова.

Проводя аналогию с химическими реакциями, выполнение программы условно можно рассматривать как аналог каталитической реакции. В каталитических реакциях катализатор в ходе реакции не расходуется. Роль катализатора состоит в понижении энергетического порога протекания реакции, в результате чего для начала реакции требуется меньшая энергия активации и протекание реакции становится возможным. В качестве аналогов катализаторов можно рассматривать программный код, который при условии некоторой идеализации можно рассматривать как неизменный. Исходные данные и результаты выполнения программ при таком подходе, соответственно, рассматриваются как аналоги субстрата и продуктов реакции.

Продолжая аналогию далее, программные агенты, способные к клонированию, можно рассматривать как модельные аналоги автокатализаторов: в результате выполнения реакции автокатализа молекулы-автокатализаторы воспроизводятся; аналогичным образом программы, способные клонировать-

ся, увеличивают свою численность в результате выполнения полезных вычислений и получения «платы» за них в виде дополнительного процессорного времени. Процессы самоорганизации в сообществах автокатализаторов со структурой гиперциклов описаны в работе М. Эйгена и П. Шустера [16].

Отличие цифрового организма неравновесного программирования от обычного программного агента состоит в том, что цифровой организм представляет собой аналог автокатализатора с переменным составом и структурой, который пересобирается (реактуализируется) на основе кодированного представления, отражающего текущее состояние цифрового организма, заданного цифровой ДНК.

Эволюция в программных системах, построенных в соответствии с парадигмой неравновесного программирования, может продолжаться непрерывно, в том числе и на стадии эксплуатации программного обеспечения, если это разрешит разработчик. Так как эволюция цифровых организмов происходит в отсутствие явно заданной фитнес-функции, популяция цифровых организмов способна эволюционно откликнуться на любое изменение состояния вычислительной среды и потоков запросов и данных пользователя. Таким образом, речь идет о непрерывной продолжающейся саморазработке программного обеспечения, что, как было установлено ранее, уже является необходимым свойством программ, предназначенных для функционирования на базе распределенных систем.

В работе [17] было отмечено существенное снижение трудоемкости разработки программного обеспечения при использовании парадигмы неравновесного программирования вплоть до нескольких десятков раз. Таким образом, процесс разработки программ может быть автоматизирован полностью, и переход к продолжающейся саморазработке программ становится реальностью.

Заключение

Среди всех биоинспирированных эволюционных методов разработки программного обеспечения, рассмотренных в данной статье, наиболее перспективными являются методы, основанные на мультиагентном подходе или близкие к нему, в том числе неравновесное программирование. Эти методы предполагают динамическое распределение подпроцессов по узлам вычислительной сети и возможность учета этими подпроцессами состояния текущего вычислительного окружения с целью оптимальной адаптации к нему, в том числе путем эволюции программного кода. Данные особенности важны и перспективны с точки зрения реализации вездесущих и всепроникающих вычислений и перехода к Интернету вещей [18].

Библиографический список

1. **Фогель, Л.** Искусственный интеллект и эволюционное моделирование : пер. с англ. / Л. Фогель, А. Оуэнс, М. Уолш. – М. : Мир, 1969. – 232 с.
2. **Holland, J. H.** Building Blocks, Cohort Genetic Algorithms, and Hyperplane-Defined Functions / J. H. Holland // *Evolutionary Computations*. – 2000. – Vol. 8 (4). – P. 373–391.
3. **Гладков, Л. А.** Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик ; под ред. В. М. Курейчика. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Физматлит, 2006. – 320 с.

4. **Mitchell, M.** Introduction to Genetic Algorithms / M. Mitchell. – Cambridge, Massachusetts ; London, England : A Bradford Book the MIT Press, 1999. – 158 p.
5. **Corno, F.** On the Evolution of Corewar Warriors / F. Corno, E. Sanchez, G. Squillero // Congress on Evolutionary Computation, CEC June 20–23 2004. – Portland (Oregon), 2004. – P. 2365–2371.
6. **Koza, J. R.** Genetic Programming: Biologically Inspired Computation that Creatively Solves Non-Trivial Problems / J. R. Koza, F. H. Bennett, D. Andre, M. A. Keane // Evolution as Computation: DIMACS Workshop, Princeton, January 1999. – Berlin Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. – P. 95–124.
7. **Паун, К.** ДНК-компьютер. Новая парадигма вычислений : пер. с англ. / К. Паун, Г. Розенберг, А. Саломаа. – М. : Мир, 2004. – 528 с.
8. **Кольчугина, Е. А.** Алгоритмы обработки данных на основе методов биокибернетики / Е. А. Кольчугина // Современные информационные технологии : тр. Междунар. науч.-техн. конф. (Computer-based conference) / под ред. В. Б. Моисеева, Л. Г. Когельмана, С. В. Трубицкова. – Вып. 4. – Пенза : Пенз. гос. технолог. академия, 2006. – С. 68–71.
9. **Рассел, С.** Искусственный интеллект: современный подход : пер. с англ. / С. Рассел, П. Норвиг. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2006. – 1408 с.
10. **Ackley, D. H.** Interaction Between Learning and Evolution / D. H. Ackley, M. L. Littman // Artificial Life II, SFI Studies in the Sciences of Complexity / ed. by C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer, S. Rasmussen. – Redwood City, CA : Addison-Wesley, 1991. – Vol. X. – P. 487–509.
11. **Yaeger, L. S.** Computational Genetics, Physiology, Metabolism, Neural Systems, Learning, Vision and Behavior or Polyworld: Life in a New Context / L. S. Yaeger // Proceedings of Artificial Life III / ed. C. G. Langton. – Redwood City, CA : Addison-Wesley, 1994. – Vol. XVII. – P. 263–298.
12. **Редько, В. Г.** Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики / В. Г. Редько ; предисл. Г. Г. Малинецкого. – Изд. 4-е, стереотип. – М. : КомКнига, 2006. – 244 с.
13. **Drogoul, A.** MANTA: New Experimental Results on the Emergence of (Artificial) Ants Societies / A. Drogoul, B. Corbara, S. Lalande // Artificial Societies: the Computer Simulation of Social Life / eds. N. Gilbert, R. Conte. – London : UCL Press, 1995. – P. 190–211.
14. **Кольчугина, Е. А.** Неравновесное программирование / Е. А. Кольчугина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 3 (11). – С. 25–31.
15. **Руденко, А. П.** Самоорганизация и синергетика / А. П. Руденко. – URL: <http://spkurdyumov.ru/what/samoorganizaciya-i-sinergetika-a-p-rudenko> (дата обращения: 11.12.2018).
16. **Эйген, М.** Гиперцикл: принципы самоорганизации макромолекул / М. Эйген, П. Шустер. – М. : Мир, 1982. – 272 с.
17. **Кольчугина, Е. А.** Теоретические основы построения самоорганизующихся программных систем с самоорганизацией континуального типа : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.17 / Кольчугина Е. А. – Пенза, 2017. – 295 с.
18. **Гофф, М. К.** Сетевые распределенные вычисления: достижения и проблемы : пер. с англ. / М. К. Гофф. – М. : КУДИЦ-ОБРАЗ, 2005. – 320 с.

References

1. Fogel' L., Owens A., Uolsh. M. *Iskusstvennyy intellekt i evolyutsionnoe modelirovanie: per. s angl.* [Artificial intelligence and evolutionary modeling: translation from English]. Moscow: Mir, 1969, 232 p.
2. Holland J. H. *Evolutionary Computations*. 2000, vol. 8 (4), pp. 373–391.

3. Gladkov L. A., Kureychik V. V., Kureychik V. M. *Geneticheskie algoritmy* [Genetic algorithms]. 2nd ed., corr. and suppl. Moscow: Fizmat-lit, 2006, 320 p.
4. Mitchell M. *Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge, Massachusetts; London, England: A Bradford Book the MIT Press, 1999, 158 p.
5. Corno F., Sanchez E., Squillero G. *Congress on Evolutionary Computation, CEC June 20–23, 2004*. Portland (Oregon), 2004, pp. 2365–2371.
6. Koza J. R., Bennett F. H., Andre D., Keane M. A. *Evolution as Computation: DIMACS Workshop, Princeton, January 1999*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002, pp. 95–124.
7. Paun K., Rozenberg G., Salomaa A. *DNK-komp'yuter. Novaya paradigma vychisleniy: per. s angl.* [DNA-computer. A new paradigm of computations: translation from English]. Moscow: Mir, 2004, 528 p.
8. Kol'chugina E. A. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii: tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Computer-based conference)* [Modern information technologies: proceedings of an International scientific and technical conference]. Issue 4. Penza: Penz. gos. tekhnolog. akademiya, 2006, pp. 68–71.
9. Rassel S., Norvig P. *Iskusstvennyy intellekt: sovremennyy podkhod: per. s angl.* [Artificial intelligence: modern approach: translation from English]. 2nd ed. Moscow: Vil'yams, 2006, 1408 p.
10. Ackley D. H., Littman M. L. *Artificial Life II, SFI Studies in the Sciences of Complexity*. Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1991, vol. X, pp. 487–509.
11. Yaeger L. S. *Proceedings of Artificial Life III*. Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1994, vol. XVII, pp. 263–298.
12. Red'ko V. G. *Evolutsiya, neyronnye seti, intellekt: Modeli i kontseptsii evolyutsionnoy kibernetiki* [Evolution, neural networks, intelligence: Models and concepts of evolutionary cybernetics]. 4th, stereotip. Moscow: KomKniga, 2006, 244 p.
13. Drogoul A., Corbara B., Lalande S. *Artificial Societies: the Computer Simulation of Social Life*. London: UCL Press, 1995, pp. 190–211.
14. Kol'chugina E. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2009, no. 3 (11), pp. 25–31.
15. Rudenko A. P. *Samoorganizatsiya i sinergetika* [Self-organization and synergy]. Available at: <http://spkurdyumov.ru/what/samoorganizatsiya-i-sinergetika-a-p-rudenko> (accessed Dec. 11, 2018).
16. Eygen M., Shuster P. *Gipertsikl: printsipy samoorganizatsii makromolekul* [Hypercycle: principles of macromolecule self-organization]. Moscow: Mir, 1982, 272 p.
17. Kol'chugina E. A. *Teoreticheskie osnovy postroeniya samoorganizuyushchikhsya programmykh sistem s samoorganizatsiey kontinual'nogo tipa: dis. d-ra tekhn. nauk: 05.13.17* [Theoretical foundations of building self-organizing software systems with continual self-organization: dissertation to apply for the degree of the doctor of engineering sciences]. Penza, 2017, 295 p.
18. Goff M. K. *Setevye raspredelennye vychisleniya: dostizheniya i problemy: per. s angl.* [Network distributed computations: achievements and problems: translation from English]. Moscow: KUDITs-OBRAZ, 2005, 320 p.

Кольчугина Елена Анатольевна

доктор технических наук, профессор,
кафедра математического обеспечения
и применения ЭВМ, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: kea@pnzgu.ru

Kol'chugina Elena Anatol'evna

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of computer software and
application, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 004.42

Кольчугина, Е. А.

Биоинспирированные методы саморазработки программ для распределенных систем / Е. А. Кольчугина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 4 (48). – С. 96–104. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-4-9.

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 005.7

DOI 10.21685/2072-3059-2018-4-10

А. О. Семенов, Н. Н. Коннов, Е. И. Гурин

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЛГОРИТМОВ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ОЧЕРЕДЕЙ В СЕТЕВОМ КОММУТАТОРЕ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются современные телекоммуникационные устройства (коммутаторы). Предметом исследования являются системы диспетчеризации современных телекоммуникационных устройств. Цель работы – создание дисциплины диспетчеризации, удовлетворяющей требованиям обеспечения качества обслуживания.

Материалы и методы. Работа посвящена оценке эффективности алгоритмов диспетчеризации очередей средствами имитационного моделирования с использованием пакета CPNTools, который основан на применении математического аппарата цветных иерархических сетей Петри.

Результаты. Сопоставлены результаты моделирования модификаций стохастического алгоритма и детерминированных алгоритмов.

Выводы. Результаты говорят о лучшем распределении неиспользуемой полосы пропускания при использовании алгоритма St1 в сравнении с классическим DRR.

Ключевые слова: стохастическая диспетчеризация, моделирование, очередь, коммутатор, качество обслуживания.

A. O. Semenov, N. N. Konnov, E. I. Gurin

ON USING ALGORITHMS OF STOCHASTIC DISPATCHING OF QUEUES IN A NETWORK SWITCHER

Abstract.

Background. The research deals with modern telecommunicational devices (switches). The subject of research is a set of modern telecommunicational devices queue dispatching systems. The purpose of the study is the creation of dispatching discipline that meets the requirements of QoS and the lack of determinism.

© Чикрин Д. Е., Егорчев А. А., Голоусов С. В., Савинков П. А., Тумаков Д. Н., 2018. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Materials and methods. The paper is devoted to the evaluation of the efficiency of queue dispatching algorithms using simulation tools using the CPNTools package, which is based on the application of the mathematical apparatus of color hierarchical Petri nets.

Results. The results of modeling the modifications of the stochastic algorithm and deterministic algorithms are compared.

Conclusions. The results suggest a better allocation of unused bandwidth when using the St1 algorithm in comparison with the classic DRR.

Keywords: Stochastic dispatching system, queueing system, simulation system, CPN Tools, modeling.

На эффективность работы интеллектуальных коммутаторов с поддержкой качества обслуживания (QoS) оказывают значительное влияние реализуемые алгоритмы диспетчеризации очередей, которые, в свою очередь, оказывают существенное влияние на значение задержки передачи кадров и ее вариации (джиттер). Под термином «диспетчеризация очередей» обычно понимаются принятые алгоритмы выбора очередей на обслуживание и управление полосой пропускания, реализуемые как управление непрерывным обслуживанием выбранных очередей [1].

В коммутаторах Ethernet широко применяются циклические алгоритмы диспетчеризации (WRR – взвешенное циклическое обслуживание, DRR – дефицитное циклическое обслуживание), достоинствами которых являются исключение монополизации ресурса и простота реализации. В этих алгоритмах для каждого класса QoS-трафика выделяется своя очередь в буфере выходного порта, кадры обслуживаются в порядке возрастания их номеров, причем при отсутствии кадров в некоторой очереди алгоритм переключается на другую очередь. Количество данных, передаваемых из каждой очереди за один сеанс обслуживания, задается закрепленным за ней весом, пропорциональным выделенной для соответствующего класса полосой пропускания, причем в алгоритме WRR вес задает максимальное количество кадров, передаваемых из очереди за один сеанс обслуживания очереди, а в DRR – максимальное количество байтов данных, что позволяет более точно выделять требуемую полосу при разбросе размеров кадров в очередях [2, 3].

Как было показано в [4], недостатками циклических алгоритмов являются неконтролируемая величина джиттера коммутируемых кадров из-за разброса времени ожидания их обслуживания в различных очередях и зависимость задержки от назначенной полосы для классов трафика полосы пропускания, что вызвано детерминистским порядком обслуживания очередей и невозможностью перераспределения неиспользуемой полосы пропускания недогруженных каналов для расширения полосы пропускания перегруженных.

Известен алгоритм справедливого взвешенного обслуживания (WFQ), который лишен отмеченных выше недостатков, однако для реализации требует значительных ресурсов, что ограничивает его применение в коммутаторах Ethernet. Он чаще используется в реализациях мощных маршрутизаторов с поддержкой QoS [5].

В работе [6] были предложены динамические TSS и адаптивные алгоритмы циклической диспетчеризации DRR-TSS, учитывающие время ожидания и ограничивающие время непрерывного обслуживания очередей, которые обеспечивают меньший разброс значений джиттера при продвижении трафика различных классов QoS, а также более комфортные условия передачи тра-

фика в случае разбалансирования выделяемой для них полосы пропускания. К недостаткам можно отнести необходимость контроля времени нахождения кадров в очередях, что увеличивает затраты памяти и усложняет выбор очереди из-за необходимости поиска очереди с «самым старым» кадром.

В настоящей работе предлагается для управления очередями в коммутаторах использовать стохастические методы, основанные на принципах случайного выбора очереди, которые находят применение при диспетчеризации очередей в операционных системах или коммутаторах [7–9]. Формальное описание стохастического алгоритма диспетчеризации очередей и одна из возможных его реализаций приведены в работах [10–12]. В статье оценена эффективность алгоритмов диспетчеризации очередей средствами имитационного моделирования с использованием пакета CPNTools, который основан на применении математического аппарата цветных иерархических сетей Петри [13]. Сопоставлены результаты моделирования модификаций стохастического алгоритма и детерминированных алгоритмов. При этом были использованы модели сетей Петри, реализующих известные алгоритмы DRR и DRR-TSS [4, 14, 15].

Структура сети Петри, моделирующей алгоритм St1, основанный на принципах стохастического выбора очереди (правило выбора очереди – псевдослучайное равновероятное, выбор осуществляется только среди непустых очередей, производимые выборки возвратны, номинальные объемы обслуживания для каждой очереди различны и пропорциональны выделяемым долям полосы пропускания), – показана на рис. 1.

В сеть Пети, моделирующую алгоритм St1, были введены два условных типа маркеров:

1. «Информационные» маркеры, продвижение которых имитирует обработку кадра в коммутаторе:

- Множество цветов *frm* отражает структуру передаваемого кадра Ethernet и анализируется на очередном этапе обработки кадра в коммутаторе.

- Множество цветов *frame* представляет однонаправленный канал, который может быть либо занят передачей кадра (*frm*), либо свободен (*avail*), что позволяет выявлять и обрабатывать события, связанные с наличием или отсутствием кадра.

- Маркеры с цветом *avail* позволяют обеспечить безопасность сети Петри (один маркер в любой позиции) и решить проблему отсутствия в CPNTools ингибиторных (запрещающих) дуг.

2. «Управляющие» маркеры, цвет которых отображает состояние обработки потока кадров в коммутаторе (размер очереди, количество переданных данных, признак очистки очереди и др.).

Задержки коммутации и сериализации коммутатора задаются на исходящем переходе выходного порта. За единицу модельного времени берется время передачи одного бита в входном/выходном портах.

В состав всех представленных моделей стохастических диспетчеров входят:

1. Генератор трафика (*SetTraf*) – блок, отвечающий за создание и передачу последующим блокам информации в формате, который можно представить в виде кортежа (цвета *frame*):

$$(number, src, dst, qos, szfrm, delay). \quad (1)$$

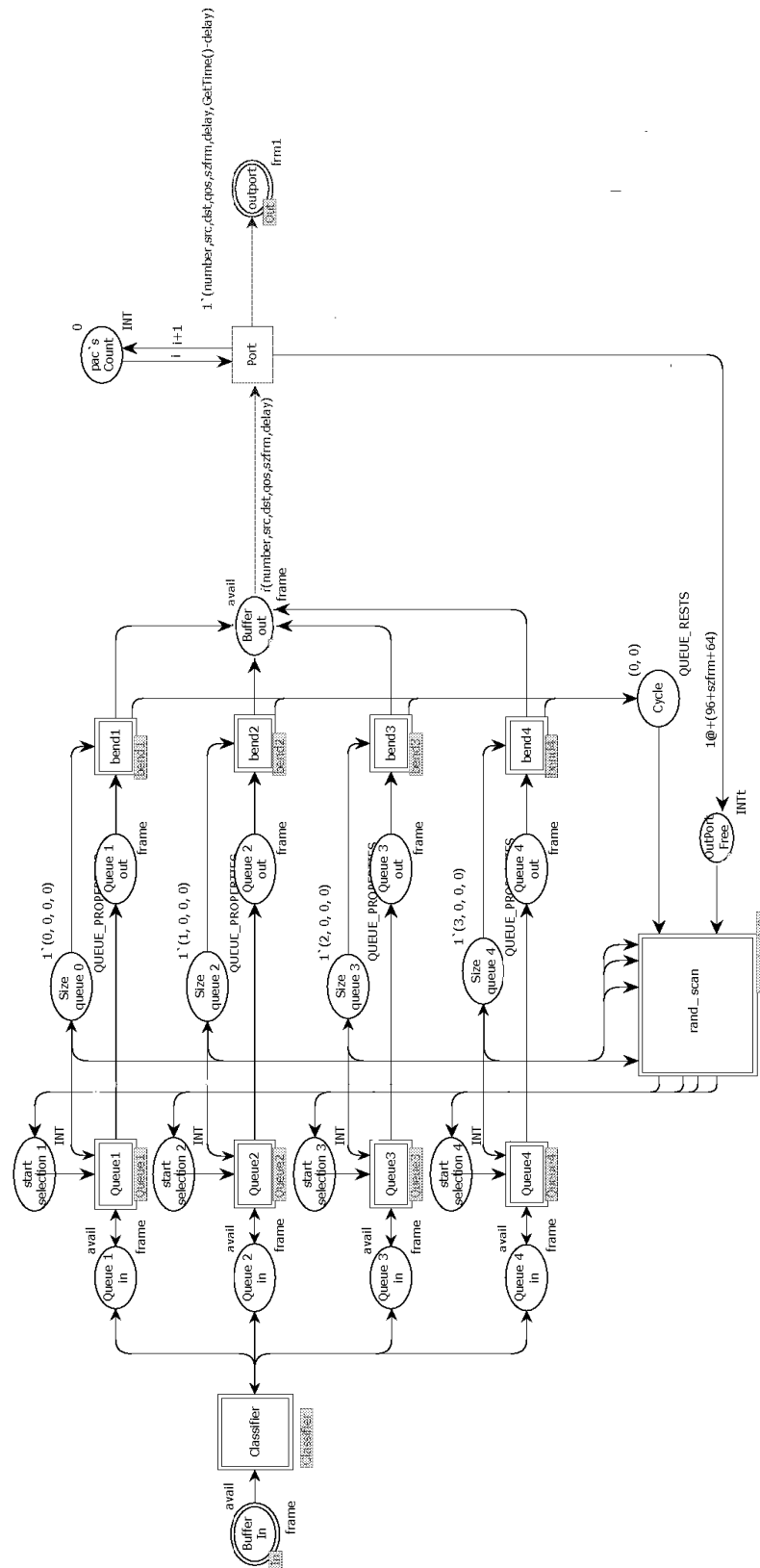


Рис. 1. Блок выходного порта

В формуле (1) *number* – номер кадра; *src* – идентификатор отправителя; *dst* – идентификатор получателя; *qos* – идентификатор класса обслуживания; *szfrm* – размер кадра; *delay* – время (задержка) начала формирования кадра.

2. Входной буфер (*Bufferin*) – позиция-буфер, содержащая накопленные кадры, еще не прошедшие через процедуру классификации.

3. Буфер выходного порта (*Buffer*) – блок, отвечающий за последовательную классификацию, хранение и продвижение кадров разнородного трафика к выходному каналу согласно заранее определенным правилам диспетчеризации.

4. Выходной буфер (*Bufferout*) – позиция-буфер, содержащая кадры, отображенные диспетчером и направляемые в выходной канал.

5. Узел передачи кадра в канал связи (*OutPort*).

6. Позиция-флаг свободного канала связи (*OutPortFree*).

7. Позиция-агрегатор кадров, поступивших в канал связи (*output*).

В состав блока *Buffer* всех представленных моделей стохастического диспетчера входят:

1) входная связующая позиция подсети (*BufferIn*);

2) классификатор кадров (*Classifier*);

3) *Queue1In...Queue4In* – позиции, содержащие кадры, прошедшие процедуру классификации и направляемые в очереди *Queue1...Queue5*;

4) подсети очередей, содержащие маркеры кадров и очередей, ожидающих обслуживания (*Queue1...Queue4* и *Sizequeue1out...Sizequeue3out*) в виде двух кортежей (цветов *frame*, см. выше, и *QUEUE_PROPERTIES*):

$$(n, sz, nIsNtEmpty, nBytesTransmitted), \quad (2)$$

где *n* – идентификатор очереди, соответствующей набору классов обслуживания; *sz* – длина очереди; *nIsNtEmpty* – флаг, отображающий наличие кадра(ов) в очереди; *nBytesTransmitted* – примерное количество переданных в канал связи битов по соответствующему классу обслуживания;

5) *bend1, ..., bend4* – подсети, выделяющие полосу пропускания для трафика каждой очереди;

6) выходная связующая позиция подсети (*OutPortFree*);

7) позиция *Cycle*, содержащая инструкции для блока *rand_scan* в виде кортежа (цвет *QUEUE_RESTS*):

$$(nGen, nCycleScan), \quad (3)$$

где *nGen* – номер очереди, предлагаемой к объективному процессу выборки кадра; *nCycleScan* – номер цикла (фаза) обслуживания выборки;

8) входная связующая позиция подсети (*Output*) и другие блоки.

В рамках реализации блока *rand_scan* осуществляется генерация псевдослучайного числа *nRand* согласно равномерному распределению. Каждой *j*-й очереди ставится в соответствие числовое значение *nCrit_j*: нуль или единица для пустых и непустых очередей соответственно, причем

$$nSummCrit_{j+1} = nSummCrit_j + nCrit_{j+1}. \quad (4)$$

Затем вычисляется разность $nRand$ и $nSummCrit_j$ для каждой j -й очереди. Выбирается на обслуживание очередь с меньшим идентификационным номером, удовлетворяющая требованию знакоотрицательности вышеназванной разности.

Структура сети Петри, моделирующей алгоритм St3, основанный на принципах стохастического выбора очереди, согласно которому сеансы обслуживания очередей разделены на чередующиеся подсеансы первого типа (циклического обслуживания) и второго типа (стохастического обслуживания), причем номинальные объемы выборок первого типа различны и пропорциональны выделяемым долям полосы пропускания, сеанс обслуживания согласно выборке первого типа делится на равные по длительности подсеансы обслуживания, прерываясь на сеансы обслуживания согласно выборке второго типа, номинальные объемы обслуживания второго типа определяются величиной длины первого кадра в выбранной наугад очереди; правило выборок первого типа – циклическое (сходно с алгоритмом DRR), правило выборок второго типа – псевдослучайное, вероятности каждой из выборок одинаковы, производимые выборки возвратны, сходна со структурой сети Петри, моделирующей алгоритм St1 за исключением некоторых функциональных особенностей. Представленные изменения заложены в тело функции *fun ChooseBand*($i, n, sz, k, szfrm, nCycleNo, cnNoOfCycles$) (рис. 2), осуществляющей разделение большого сеанса на подсеансы путем вызова функции. Краткое описание действий, производимых функцией, приведено в виде системы:

$$\begin{aligned} ((nCycleNo \bmod 2) = 1) &\supset (z_1 = 1), \\ (i = n) &\supset (z_2 = 1) \quad (y_1 = \overline{z_1 z_2}) \supset (nCycleNo = 0), \\ (y_2 = z_1 \overline{z_2}) &\supset (sz = 1), \\ (sz > 0) &\supset (x_1 = 1) \quad ((k - szfrm) > 0) \supset (x_2 = 1), \\ ((nCycleNo \bmod 2) = 1) &\supset (x_3 = 1), \\ (nCycleNo \geq (cnNoOfCycles - 1)) &\supset (x_4 = 1), \\ yy_1 = \overline{x_1 x_3} \vee \overline{x_1 x_2 x_3} \vee \overline{x_1 x_3 x_4}, \quad yy_2 = \overline{x_1 x_2 x_3}, \quad yy_3 = \overline{x_1 x_3} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4}, \\ rr_1 = (i, nCycleNo + 1), \quad rr_2 = (i, nCycleNo), \quad rr_3 = (((i + 1) \bmod ciMaxQuNo), 0), \\ (yy_j = 1) &\supset (rr = rr_j), \end{aligned} \tag{5}$$

где $nCycleNo$ – номер текущего подсеанса, причем подсеансы с четным номером обслуживаются циклически (подсеансы первого типа), а подсеансы с нечетным номером обслуживаются случайно (подсеансы второго типа); $x_j, y_j, z_j, yy_j, rr, rr_j$ – управляющие сигналы, предназначенные для управления полосой пропускания; rr является переменной, содержащей возвращаемое функцией значение.

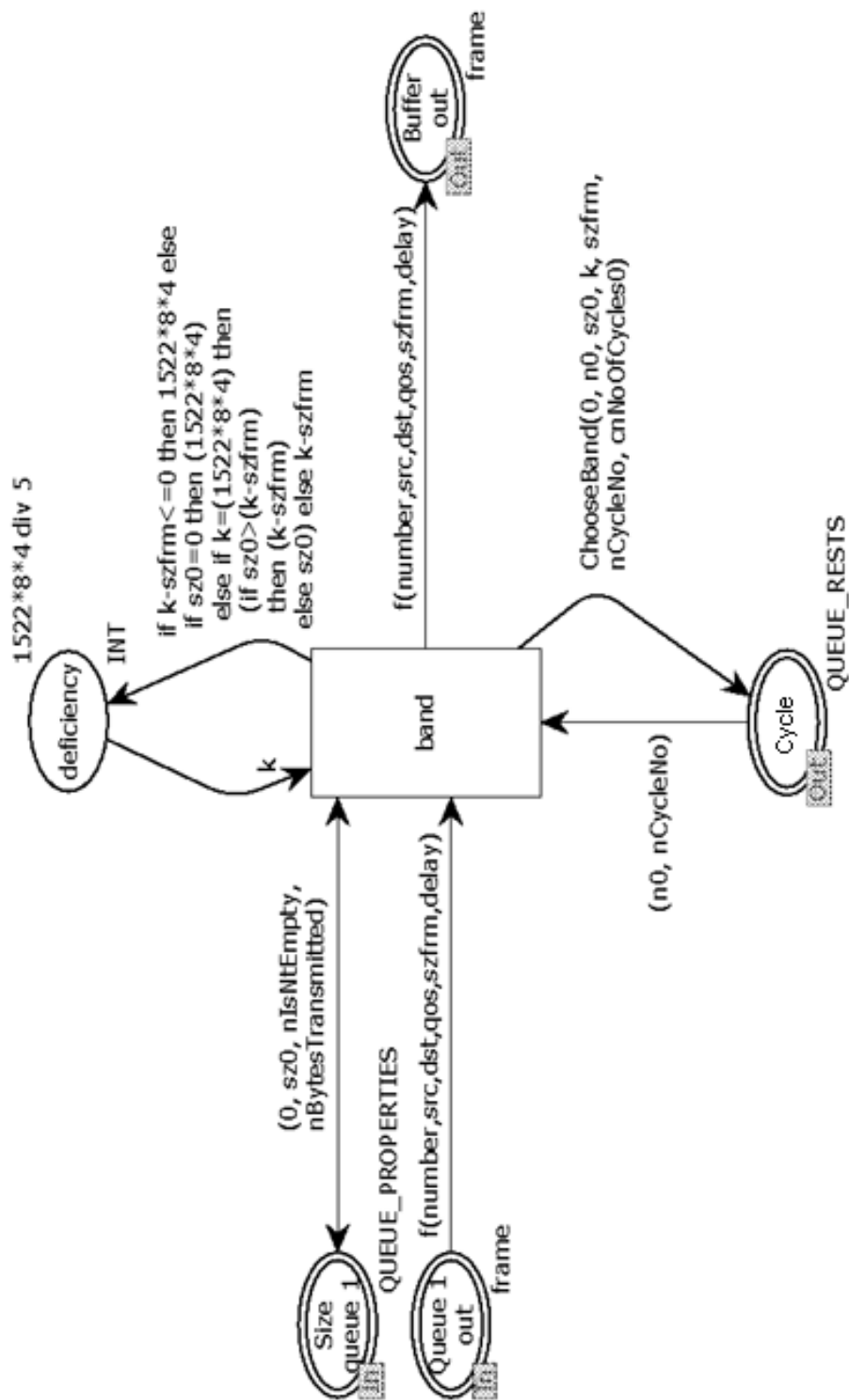


Рис. 2. Подсети, выделяющие полосу пропускания для графика каждой очереди

Подсеть *rand_scan* (далее – устройство стохастической диспетчеризации в составе коммутатора или маршрутизатора) очередей сетевого коммутатора с поддержкой качества обслуживания содержит: генератор псевдослучайных чисел; узел хранения постоянных величин (ПЗУ); узел подсчета вероятностей выбора очередей на обслуживание; узел сравнения величин; узел подсчета номера обслуживаемой очереди. На рис. 1 показана подсеть диспетчера, принимающая на свои входы длины очередей, а на выходы поступает единственная метка обслуживания очереди.

В качестве критерия оценки эффективности того или иного алгоритма часто используется оценка интегральных функций распределения значений джиттера трафика различных классов QoS для каждого из алгоритмов на одинаковом наборе входных данных. Входной трафик моделируется с помощью специальной сети Петри и представляет комбинацию потока кадров, принадлежащих с равной вероятностью четырем классам QoS и следующих через временные интервалы, распределенные по экспоненциальному закону со средним значением периода поступления, и квазирегулярный поток с редкими кадрами максимальной длительности. Коэффициент загрузки канала равен 0,8. Модельное время, выраженное в тактовых интервалах TI, равно 100 нс для Ethernet или 10 нс для FastEthernet. Случайная длина кадров имеет следующее распределение, соответствующее реальным сетям: по 25 % от всех кадров имеют минимальную и максимальную длину (соответственно TI 512 и 12176), длина остальных равномерно распределена в оставшемся диапазоне.

Кадры имеют равновероятные метки QoS от 0 до 7. Формируются четыре класса трафика, которым выделяются соответствующие очереди, и устанавливаются следующие значения полосы пропускания: очередь с QoS 0-1 – 10 %, QoS 2-3 – 20 %, QoS 4-5 – 30 %, QoS 6-7 – 40 % от выходной полосы, т.е. генерируемый трафик класса QoS 0-1 превышает выделенную для него полосу в два раза, QoS 2-3 согласован с выделенной полосой пропускания, а QoS 4-5 и 6-7 недогружают выделенные полосы. Параметры квот управления полосой пропускания заданы 1, 2, 3, 4 кадрами для WRR-алгоритмов, и 12176, 24352, 36528 и 48704TI для DRR-алгоритмов. Длительности подсеансов устанавливаются равными двум кадрам для WRR-TSS-алгоритмов, а для DRR-TSS-алгоритмов варьируется 3040, 12176, 24352TI.

В качестве критерия справедливости распределения реальной полосы пропускания принимается вариация средних значений джиттера трафика различных классов QoS.

Интегральные функции распределения значения джиттера трафика различных классов обслуживания для алгоритмов диспетчеризации, обеспечивающих управление полосой пропускания, представлены ниже для алгоритмов DRR (рис. 3,*а*), алгоритма DRR-TSS (с временной селекцией кадров, рис. 3,*б*), алгоритма St1 (рис. 3,*в*), алгоритма St3 (рис. 3,*г*).

На графиках, изображаемых на рис. 3, горизонтальная ось отображает задержку кадра, а горизонтальная ось – интегральную функцию распределения значения задержки трафика различных классов обслуживания для алгоритмов диспетчеризации, обеспечивающих управление полосой пропускания.

В табл. 1 и 2 продемонстрированы средние и максимальные значения джиттера по очередям на двух разных наборах входных данных (согласованные и несогласованные).

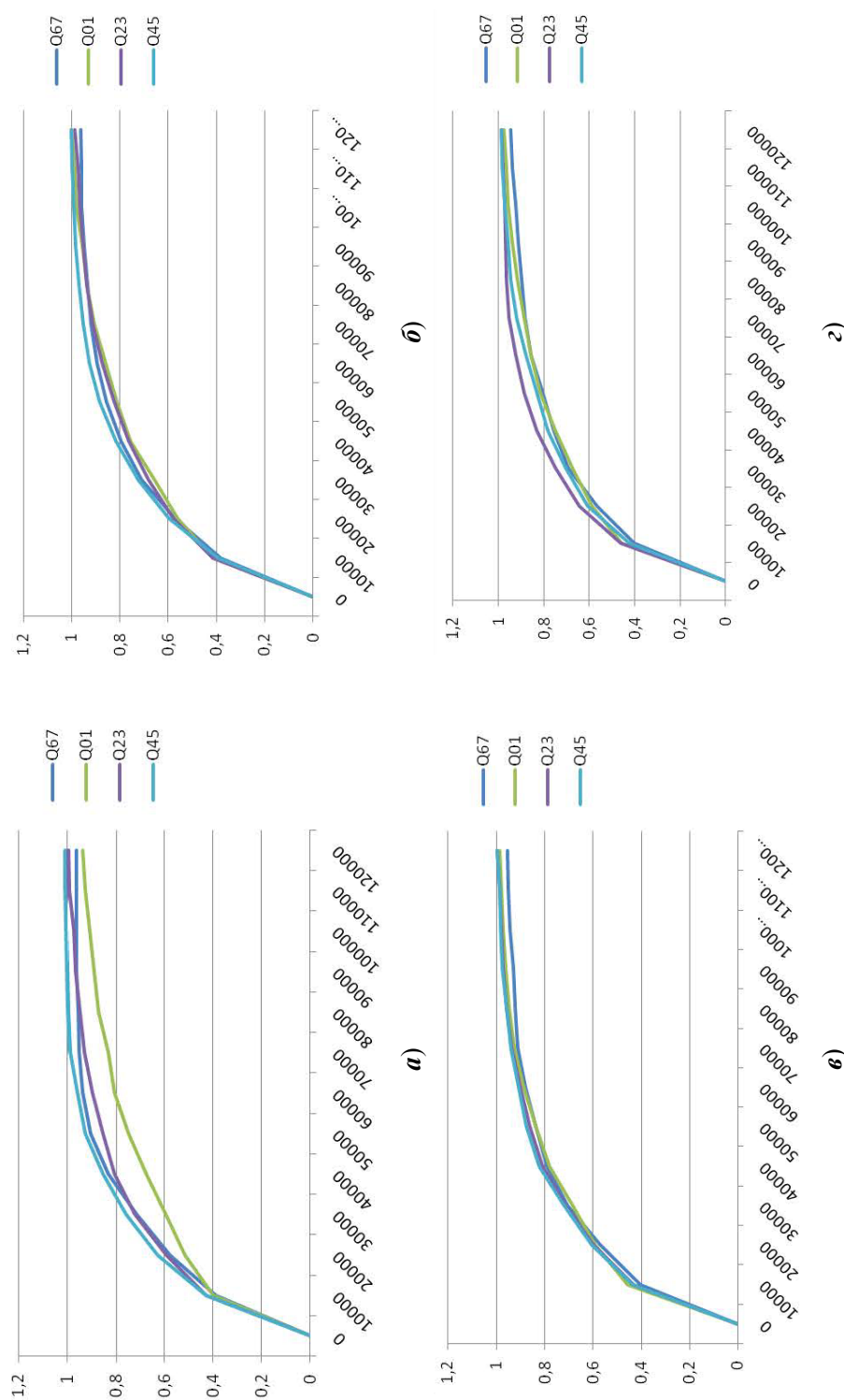


Рис. 3. Функции распределения значения джиттера трафика различных классов обслуживания для алгоритма диспетчеризации: а – DRR; б – DRR-TSS; в – ST1; г – ST3

Таблица 1
Средние и максимальные значения джиттера по очередям (поток 1)

	Несогласованные данные							
	St1		St3		DrrTss		Drr	
	Макс. задержка	Ср. знач.	Макс. задержка	Ср. знач.	Макс. задержка	Ср. знач.	Макс. задержка	Ср. знач.
QoS0-1	179892	22294	276808	25492	135998	21664	418825	34904
QoS2-3	260306	23121	254538	25213	141382	22399	159888	22498
QoS4-5	158529	23238	211852	21726	199584	26848	96584	31162
QoS6-7	443497	28125	222937	29211	196943	27498	141439	21255
Вариация	284968	5830	64956	7484	63586	5833	322241	13742

Таблица 2
Средние и максимальные значения джиттера по очередям (поток 2)

	Согласованные данные							
	St1		St3		DrrTss		Drr	
	Макс. задержка	Ср. знач.	Макс. задержка	Ср. знач.	Макс. задержка	Ср. знач.	Макс. задержка	Ср. знач.
QoS0-1	253725	23935,4	193802	28738,27	149006	25959,8	274113	28998
QoS2-3	245693	25052,0	196212	21431,67	162224	26084,5	235586	29119
QoS4-5	238469	29100,9	213717	24703,69	162442	23690,3	160710	22478
QoS6-7	149534	25851,8	252426	28558,78	156474	20489,2	157244	23291
Вариация	104191	5165,46	58624	7306,599	13436	5595,20	116869	6641

Зафиксированы относительно низкие значения вариаций средних значений задержки по разным классам обслуживания у алгоритма St1. Вариация максимальных значений задержек по каждому классу обслуживания ниже у алгоритма DRR-TSS. Можно сделать вывод о незначительно лучшем перераспределении неиспользуемой полосы пропускания таким образом, чтобы снизить задержку в перегружаемых очередях за счет наиболее недогруженных, а также о явно лучшем распределении неиспользуемой полосы пропускания при использовании алгоритма St1 в сравнении с классическим DRR.

В табл. 1, 2 для стохастических алгоритмов зафиксированы вариации средних значений задержек, аналогичные неклассическому алгоритму DRR-TSS, и низкие средние значения вариаций задержек относительно классического циклического алгоритма на наборе несогласованных данных. Это говорит о перераспределении неиспользуемой полосы пропускания таким образом, чтобы снизить задержку в перегружаемых очередях за счет наиболее недогруженных.

Библиографический список

1. **Олифер, В. Г.** Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – 4-е изд. – СПб. : Питер, 2010. – 943 с.
2. **Кучерявый, Е. А.** Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет / Е. А. Кучерявый. – СПб. : Наука и техника, 2004. – 336 с.
3. Handbook on Scheduling from Theory to Applications / J. Blazewicz, K. Ecker, E. Pesch, G. Schmidt, J. Weglarz. – Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2007. – 654 p.
4. **Кизилов, Е. А.** Алгоритмы и модели диспетчеризации очередей в компьютерных сетях с поддержкой качества обслуживания : дис. ... канд. техн. наук / Кизилов Е. А. – Пенза, 2017. – 149 с.
5. **Barreiros, M.** QoS-enabled networks tools and foundations / M. Barreiros, P. Lundqvist. – Wiley : John Wiley & Sons, 2016. – 254 p.
6. **Кизилов, Е. А.** Моделирование адаптивной диспетчеризации очередей в коммутаторе с поддержкой QoS / Е. А. Кизилов, Н. Н. Коннов, Д. В. Патуний // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 2 (22). – С. 170–183.
7. Intel® Ethernet Switch FM5000/FM6000. 1 Gb/2.5 Gb/10 Gb/40 Gb Ethernet (GbE). L2/L3/L4 Chip Datasheet. Revision 3.5. July 2017. 331496-002. – URL: <https://www.intel.ru/content/www/ru/ethernet-products/switch-silicon/ethernet-switch-fm5000-fm6000-datasheet.html> (дата обращения: 15.03.2018).
8. Patent EP 1887742 A1 System and process for QOS-based packet scheduling. – URL: <https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument> (дата обращения: 15.03.2018).
9. Patent 5,247,677 U.S. STOCHASTIC PRIORITY-BASED TASK SCHEDULER. – URL: <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser> (дата обращения: 15.03.2018).
10. **Коннов, Н. Н.** Стохастический подход к диспетчеризации очередей в коммутаторах / Н. Н. Коннов, А. О. Семенов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 72–83.
11. **Семенов, А. О.** Стохастический подход к диспетчеризации очередей / А. О. Семенов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : сб. ст. XII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Курск, 12–16 мая 2015 г.). – Курск : ЮЗГУ, 2015. – С. 331–333.
12. **Семенов, А. О.** Имитационная модель устройства, реализующего стохастическую диспетчеризацию очередей коммутатора / А. О. Семенов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, заявка № 2017663456. – зарег. 04.12.2007.

13. **Jensen, K.** *Colored Petri Nets – Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use* / K. Jensen. – Berlin : Springer-Verlag, 1997. – Vol. 1–3. – 673 p.
14. **Никишин, К. И.** Генератор трафика Ethernet на основе цветных сетей Петри / К. И. Никишин, Н. Н. Коннов // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. – 2016. – № 1 (17). – С. 299–307.
15. **Семенов, А. О.** Моделирование алгоритма стохастической диспетчеризации очередей в пакете / А. О. Семенов, Н. Н. Коннов // *Новые информационные технологии и системы (НИТиС-2017)* : сб. науч. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 22–24 ноября 2017 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2017. – С. 133–135.

References

1. Olifer V. G., Olifer N. A. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly* [Computer networks. Principles, technologies, protocols]. 4th ed. Saint-Petersburg: Piter, 2010, 943 p.
2. Kucheryavyy E. A. *Upravlenie trafikom i kachestvo obsluzhivaniya v seti Internet* [Traffic management and service quality on the Internet]. Saint-Petersburg: Nauka i tekhnika, 2004, 336 p.
3. Blazewicz J., Ecker K., Pesch E., Schmidt G., Weglarz J. *Handbook on Scheduling from Theory to Applications*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007, 654 p.
4. Kizilov E. A. *Algoritmy i modeli dispetcherizatsii ocheredey v komp'yuternykh setyakh s podderzhkoy kachestva obsluzhivaniya: dis. kand. tekhn. nauk* [Algorithms and models of queues dispatching in computer networks maintaining the quality of service: dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Penza, 2017, 149 p.
5. Barreiros M., Lundqvist P. *QoS-enabled networks tools and foundations*. Wiley : John Wiley & Sons, 2016, 254 p.
6. Kizilov E. A., Konnov N. N., Patunin D. V. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in economy, technology, nature and society]. 2017, no. 2 (22), pp. 170–183.
7. Intel® Ethernet Switch FM5000/FM6000. 1 Gb/2.5 Gb/10 Gb/40 Gb Ethernet (GbE). L2/L3/L4 Chip Datasheet. Revision 3.5. July 2017. 331496-002. Available at: <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/ethernet-products/switch-silicon/ethernet-switch-fm5000-fm6000-datasheet.html> (accessed March 15, 2018).
8. Patent EP 1887742 A1 *System and process for QOS-based packet scheduling*. Available at: <https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument> (accessed March 15, 2018).
9. Patent 5,247,677 U.S. *STOCHASTIC PRIORITY-BASED TASK SCHEDULER*. Available at: <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser> (accessed March 15, 2018).
10. Konnov N. N., Semenov A. O. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2016, no. 3 (39), pp. 72–83.
11. Semenov A. O. *Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii: sb. st. XII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Kursk, 12–16 maya 2015 g.)* [Modern instrument systems, information technologies and innovations: proceedings of XII International scientific and technical conference (Kursk, May 12th-16th 2015)]. Kursk: YuZGU, 2015, pp. 331–333.
12. Semenov A. O. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM, zayavka № 2017663456* [Certificate of state registration of computer software, application № 2017663456].
13. Jensen K. *Colored Petri Nets – Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use*. Berlin: Springer-Verlag, 1997, vol. 1–3, 673 p.

14. Nikishin K. I., Konnov N. N. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in economy, technology, nature and society]. 2016, no. 1 (17), pp. 299–307.
15. Semenov A. O., Konnov N. N. *Novye informatsionnye tekhnologii i sistemy (NITiS-2017): sb. nauch. st. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Penza, 22–24 noyabrya 2017 g.)* [New information technologies and systems 2017: proceedings of XI international scientific and practical conference (Penza, November 22nd – 24th, 2017)]. Penza: Izd-vo PGU, 2017, pp. 133–135.

Семенов Андрей Олегович

аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: andre20071@yandex.ru

Semenov Andrey Olegovich

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza, Rus-
sia)

Коннов Николай Николаевич

кандидат технических наук, профессор,
кафедра вычислительной техники,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: knn@pnzgu.ru

Konnov Nikolay Nikolaevich

Candidate of engineering sciences,
professor, sub-department of computer
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Гурин Евгений Иванович

доктор технических наук, профессор,
кафедра вычислительной техники,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: gurin2@yandex.ru

Gurin Evgeniy Ivanovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of computer engineering,
Penza State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 005.7

Семенов, А. О.

Об использовании алгоритмов стохастической диспетчеризации очередей в сетевом коммутаторе / А. О. Семенов, Н. Н. Коннов, Е. И. Гурин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 4 (48). – С. 105–117. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-4-10.

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ В МОБИЛЬНЫХ УЗЛАХ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются мобильные узлы связи. Предметом исследования является применение современных телекоммуникационных решений в мобильных узлах связи. Цель работы – создание отказоустойчивой и надежной системы по передаче информации, обеспечивающей высокий уровень информационной безопасности за счет применения современных телекоммуникационных решений, а также использование их в совокупности.

Материалы и методы. Применен протокол BFD совместно с протоколом IS-IS для быстрого восстановления работоспособности сети после сбоя и переключения на резервный канал.

Результаты. Разработана общая схема транспортной сети мобильного узла связи. В качестве протокола маршрутизации предложено использовать протокол внутрисетевой маршрутизации IS-IS совместно с протоколом выявления сбоев в канале передачи BFD для определения сбоев в канале передачи данных за кратчайшее время и переходить на другой доступный канал. Для обеспечения высокого уровня информационной безопасности предлагается применять технологию VRF (виртуальная маршрутизация) для каждого используемого канала связи, отдельно создавая виртуальный маршрутизатор для удаленного управления сетевым оборудованием.

Выводы. Описанная реализация системы связи мобильного узла позволит обеспечить высокий уровень информационной безопасности за счет применения современных телекоммуникационных решений, а также использования их в совокупности. Обеспечение резервирования каналов связи повысит надежность и безопасность предоставляемых услуг связи.

Ключевые слова: мобильный узел связи, канал передачи данных, MPLS, маршрутизация IS-IS.

L. V. Kuts, T. A. Govor, S. V. Kachalin

THE USE OF MODERN TELECOMMUNICATION SOLUTIONS IN THE ORGANIZATION OF MOBILE NODES

Abstract.

Background. The object of the study is mobile communication nodes. The subject of the research is the application of modern telecommunication solutions in mobile communication nodes. The aim of the work is to create a fault - tolerant and reliable information transmission system that provides a high level of information security through the use of modern telecommunication solutions, as well as their use in the aggregate.

© Куц Л. В., Говор Т. А., Качалин С. В., 2018. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Materials and methods. The use of BGP in conjunction with the is-is Protocol for fast recovery of a network after a failure and switch to backup channel.

Results. The General scheme of a transport network of a mobile communication node is developed. As a routing Protocol, it is proposed to use the IS-IS intra-domain routing Protocol together with the failure detection Protocol in the BFD transmission channel to identify failures in the data transmission channel in the shortest time and move to another available channel. To ensure a high level of information security, it is proposed to use VRF technology(virtual routing) for each communication channel used, separately creating a virtual router for remote management of network equipment.

Conclusions. The described implementation of the mobile node communication system will provide a high level of information security through the use of modern telecommunication solutions, as well as their use in combination. Provision of redundant communication channels will improve the reliability and security of communications services.

Keywords: mobile communication node, data channel, MPLS, IS-IS routing.

В настоящее время перед мобильными узлами связи (МУС) поставлены задачи по обеспечению отказоустойчивости и надежности передачи информации. Перечень возможных услуг специальной связи постоянно расширяется. В связи с переходом организационно-технических структур сетей связи специального назначения для нужд государственного управления Российской Федерации на использование цифровых сетей передачи данных меняются и требования абонентов к терминальным устройствам.

В рассмотренных современных отечественных узлах связи [1] используется, как правило, 2–3 канала связи для передачи данных. В качестве основного выступает спутниковый канал, так как позволяет обеспечивать связь из любой точки мира. В случае выхода из строя основного канала передачи данных переключение на другие каналы происходит в ручном режиме. Автоматический переход на резервные каналы не предусмотрен.

Мобильный узел связи, исходя из назначения и условий применения, должен обеспечивать:

- а) оперативную организацию и предоставление всех видов услуг специальной связи;
- б) возможность присоединения к любым сетям связи общего пользования, ведомственным сетям связи и сетям специальной связи, доступным в месте развертывания мобильного узла связи;
- в) организацию привязки к нескольким узлам одной или различных сетей связи;
- г) организацию одной или нескольких линий привязки от точек привязки присоединяемых сетей связи к месту предоставления услуг специальной связи;
- д) информационную безопасность при организации и предоставлении услуг специальной связи;
- е) горячее (нагруженное) резервирование и агрегацию пропускной способности привязок мобильного узла связи;
- ж) гарантированное качество предоставляемых услуг специальной связи, включая обеспечение надежности и устойчивости.

В качестве единой коммуникационной основы МУС используется транспортная сеть с коммутацией пакетов [2, 3]. Организация связи мобильных узлов проводится со стационарными узлами через каналы (линии) связи, организованные с использованием ресурсов сетей связи общего пользования. Выход во внутреннюю сеть и сети специальной связи предлагается осуществлять через стационарные узлы доступа. Обобщенная схема транспортной сети мобильного узла связи представлена на рис. 1.

Основными каналами передачи данных, используемыми в сетях специальной связи, являются:

- волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС): от 1 до 10 Гбит/с на расстоянии 1 км;
- проводные *xDSL* линии связи: до 15,2 Мбит/с на расстоянии до 7,5 км;
- сети *PDH/SDH*: ограниченная скорость передачи данных 2048 кб/с на один канал потока *E1*;
- беспроводной канал связи посредством использования радиоэлектронных станций широкополосного беспроводного доступа (РЭС ШБД): до 40 Мбит/с на расстоянии до 50 км в прямой видимости;
- канал связи *UMTS/LTE*: высокая скорость передачи данных до 100 Мб/с;
- спутниковый канал связи: до 30 Мбит/с в Ка-диапазоне.

Основной задачей МУС является обеспечение бесперебойной, устойчивой связи. Поэтому необходимо использовать все доступные каналы связи на случай выхода из строя одного (нескольких) каналов связи. Следует обеспечить автоматическое переключение на резервный канал связи за время не более 1 с без перерыва текущего сеанса связи, предоставляя при этом высокое качество услуг. Такое время переключения на резервный канал критично для передачи голоса, телефонии. Резервирование каналов возможно реализовать на платформе MPLS-маршрутизатора, что позволит обеспечить высокую скорость обработки маршрутной информации. Преимуществом использования технологии MPLS является быстрое восстановление работоспособности сети после сбоя. В основе механизма отказоустойчивости в IP-сетях лежат протоколы маршрутизации. В случае выхода из строя канала связи соседние узлы обнаруживают это и отражают изменения в сетевой топологии в своих служебных сообщениях. Для некоторых видов сетевых топологий время, прошедшее между сбоем и обновлением таблиц маршрутизации на всех узлах сети, может быть уменьшено с нескольких десятков секунд до нескольких секунд при использовании специальных механизмов снижения времени сходимости [4].

В качестве протокола маршрутизации предлагается использовать протокол внутрисетевой маршрутизации IS-IS совместно с протоколом выявления сбоев в канале передачи BFD, что позволит маршрутизатору определять сбои в канале передачи данных за время менее 1 с и переходить на другой доступный канал [5, 6]. Помимо этого, необходимо для каждого канала связи создать отдельные VLAN (виртуальная локальная сеть). Услуги, которые предоставляет мобильный узел связи, изолированы в отдельные виртуальные локальные сети (VLAN). Технология VLAN позволяет изолировать сети внутри одного VLANa, независимо от того, подключены ли сети к одному маршрутизатору (или коммутатору) или к разным.

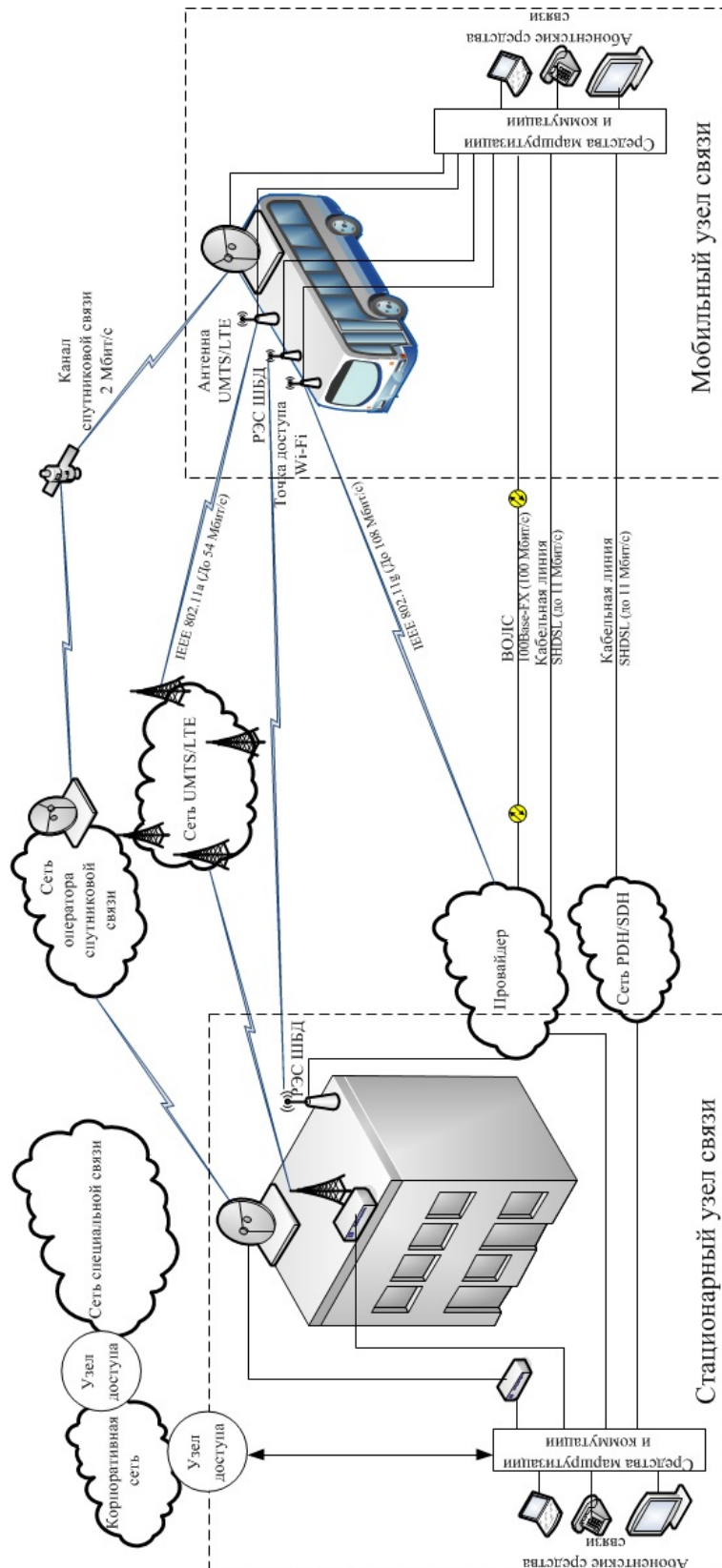


Рис. 1. Общая схема транспортной сети мобильного узла связи

С целью обеспечения высокого уровня информационной безопасности предлагается применять технологию VRF (виртуальная маршрутизация) для каждого используемого канала связи, отдельно создавая виртуальный маршрутизатор для удаленного управления сетевым оборудованием. Работа каждого канала будет изолирована и маршрутизируется внутри одного виртуального маршрутизатора.

Каждый канал связи должен быть организован в отдельном туннельном интерфейсе (например, GRE-туннеле). Основным назначением GRE-протокола является туннелирование сетевых пакетов (инкапсуляция пакетов сетевого уровня сетевой модели OSI в IP пакеты).

Одним из важных аспектов разработки современных систем связи является применение технологии качества обслуживания сети (QoS), которая предоставляет гибкий и универсальный механизм приоритезации предоставляемых услуг связи. Применение технологии QoS в системе связи узлов доступа с мобильными узлами связи позволяет обеспечить необходимый уровень качества услуг [7].

Таким образом, предлагаемая схема организации связи в мобильных узлах обеспечит высокий уровень информационной безопасности и повысит надежность предоставляемых услуг связи.

Библиографический список

1. **Сериков, И. В.** Аппаратные управления и телекоммуникации, полевые подвижные инфокоммуникационные комплексы, мобильные пункты доступа разработки ОАО «НПП «Рубин» / И. В. Сериков, В. Е. Кузнецов, Ю. И. Серикова // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: СОИУ. – 2015. – Вып. 2. – С. 142–158.
2. **Олифер, В. Г.** Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учеб. для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – 4-е изд. – СПб. : Питер, 2010. – 944 с.
3. **Таненбаум, Э.** Компьютерные сети / Э. Таненбаум, Д. Уэзеролл. – 5-е изд. – СПб. : Питер, 2012. – 960 с.
4. **Макаренко, С. И.** Время сходимости протоколов маршрутизации при отказах в сети / С. И. Макаренко // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – № 2. – С. 45–98.
5. **Гольдштейн, А. Б.** Технология и протоколы MPLS / А. Б. Гольдштейн, Б. С. Гольдштейн. – СПб. : БХВ – Санкт-Петербург, 2005. – 304 с.
6. **Martey, A.** IS-IS Network Design Solutions / A. Martey. – Indianapolis : Cisco Press, 2002. – 405 с.
7. Официальный сайт компании Cisco Systems. – URL: <http://cisco.com> (дата обращения: 12.02.2018).

References

1. Serikov I. V., Kuznetsov V. E., Cerikova Yu. I. *Voprosy radioelektroniki. Ser.: SOIU* [Issues of radio electronics. Series: SIDM]. 2015, iss. 2, pp. 142–158.
2. Olifer V. G., Olifer N. A. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly: ucheb. dlya vuzov* [Computer networks. Principles, technologies, protocols: textbook for universities]. 4th ed. Saint-Petersburg: Piter, 2010, 944 p.
3. Tanenbaum E., Uezeroll D. *Komp'yuternye seti* [Computer networks]. 5th ed. Saint-Petersburg: Piter, 2012, 960 p.
4. Makarenko S. I. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of management, communication and security]. 2015, no. 2, pp. 45–98.

5. Gol'dshteyn A. B., Gol'dshteyn B. S. *Tekhnologiya i protokoly MPLS* [MPLS technology and protocols]. Saint-Petersburg: BKhV – Sankt-Peterburg, 2005, 304 p.
6. Martey A. *IS-IS Network Design Solutions*. Indianapolis: Cisco Press, 2002, 405 p.
7. *Ofitsial'nyy sayt kompanii Cisco Systems* [Official site of Sisco Systems]. Available at: <http://cisco.com> (accessed Febr. 12, 2018).

Куц Леонид Валентинович

кандидат технических наук, инженер-программист, Научно-производственное предприятие «Рубин» (Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: kuts_leonid@mail.ru

Kuts Leonid Valentinovich

Candidate of engineering sciences, engineer-programmer, Research and Production Enterprise «Rubin» (2 Baydukova street, Penza, Russia)

Говор Тарас Александрович

начальник отдела, Научно-производственное предприятие «Рубин» (Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: govortaras@gmail.com

Govor Taras Aleksandrovich

Head of department, Research and Production Enterprise «Rubin» (2 Baydukova street, Penza, Russia)

Качалин Сергей Викторович

кандидат технических наук, заместитель начальника отделения, Научно-производственное предприятие «Рубин» (Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: s.kachalin@gmail.com

Kachalin Sergey Viktorovich

Candidate of engineering sciences, deputy head of department, Research and Production Enterprise «Rubin» (2 Baydukova street, Penza, Russia)

УДК 004.724.2

Куц, Л. В.

Применение современных телекоммуникационных решений при организации связи в мобильных узлах / Л. В. Куц, Т. А. Говор, С. В. Качалин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 4 (48). – С. 118–123. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-4-11.

СПОСОБ ЭФФЕКТИВНОГО КОДИРОВАНИЯ КОМАНД ТЕЛЕКОДОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются команды телекодového управления. Источником команд телекодového управления могут быть датчики телемеханических систем, ПЭВМ, должностные лица. Команды телекодového управления используются для управления самолетами и вертолетами, беспилотными летательными аппаратами, средствами воздушной разведки, робототехническими системами, мобильными транспортными средствами и др. Целью настоящей работы являются построение эффективного кода сжатия команд телекодového управления с учетом их структуры и содержания, быстрое кодирование и восстановление команд за счет заранее сформированных на передающей и приемной сторонах баз данных команд.

Материалы и методы. Предлагается эффективное сжимающее кодирование команд телекодového управления, при котором для получения кодов формализованных команд отдельно кодируют постоянную и переменную части команд. Постоянную часть команд кодируют с использованием заранее подготовленной базы данных. В базу данных команд телекодového управления помещают индексы команд телекодového управления и коэффициенты смещения и децимации для нормализации переменной части команд телекодového управления.

Результаты. Получены результаты моделирования сжатия и восстановления команд телекодového управления при использовании словарного, статистического по алгоритму Хаффмена и предлагаемого методов кодирования с использованием заранее подготовленных баз данных.

Выводы. Предлагаемое эффективное кодирование команд телекодového управления обеспечивает наибольшее сжатие информации. Сокращение объема передаваемой информации уменьшает вероятность ее искажения и повышает надежность передачи команд телекодového управления. За счет контроля структуры и содержимого команд повышаются достоверность и информационная безопасность команд.

Ключевые слова: телекодového управление, формализованные сообщения, базы данных, индексы команд, достоверность и информационная безопасность.

V. V. Kvashennikov, A. K. Shabanov, P. I. Zaytsev

A METHOD OF EFFECTIVE CODING OF TELECODE MANAGEMENT COMMANDS

Abstract.

Background. The object of the study is commands of telecode management. The source of telecode management commands can be sensors of telemechanical sys-

tems, PC, officials. Telecode management commands are used to control airplanes and helicopters, unmanned aerial vehicles, aerial reconnaissance equipment, robotic systems, mobile vehicles, etc. The goal of this work is to build an effective compression code for telecode management commands, taking into account their structure and content, fast coding and recovery of commands by means of command database formed in advance on the transmitting and receiving sides.

Materials and methods. An effective compression coding method for telecode management commands is proposed, in which the fixed and variable parts of the commands are separately encoded to obtain codes for formalized commands. The permanent part of the command code using a database formed in advance. The index of commands of the telecode management and the coefficients of displacement and decimation are placed in the database of commands of the telecode management to normalize the variable part of the telecode management commands.

Results. The results of the simulation of compression and recovery of telecode management commands were obtained using the vocabulary method, the statistical Huffman algorithm method and the proposed coding methods using databases formed in advance.

Conclusions. The proposed efficient coding of telecode management commands provides the greatest compression of information. Reducing the amount of information transmitted decreases the probability of its distortion and increases the reliability of the transmission of commands of the telecode management. By monitoring the structure and contents of commands, the reliability and information security of commands are increased.

Keywords: telecode management, formalized messages, databases, command indices, authenticity and information security.

Введение

Задачей телекодированного управления является доведение команд от источника на передающей стороне до получателя на приемной стороне. Источником команд телекодированного управления могут быть датчики телемеханических систем, ПЭВМ, должностные лица. Получателями команд на приемной стороне являются исполнительные органы систем управления, ПЭВМ, операторы, должностные лица. Передаваемые данные представляют собой команды управления самолетов и вертолетов, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), средств воздушной разведки, робототехнических систем, мобильных транспортных средств и др.

Команды телекодированного управления обычно имеют небольшой объем: от нескольких десятков до нескольких сотен битов. Количество различных команд управления небольшое – не более ста различных команд. Особенностью команд является наличие постоянной и переменной частей команд. Постоянная часть команд определяет действия получателя команд, а переменная часть – параметры выполняемого действия, которые могут изменяться в некотором допустимом диапазоне значений. Например, команды: вверх | 5, вниз | 10, вправо | 3, влево | 6, скорость | 4 и т.д.

Таким образом, команды телекодированного управления представляют собой последовательности символов, которые можно разделить на две части:

$$K=C \mid V, \quad (1)$$

где C – постоянная часть команд телекодированного управления; V – переменная часть команд телекодированного управления.

Команды телекодowego управления передают в виде кода, обеспечивающего сжатие исходной информации. Цель настоящей работы – построение эффективного кода сжатия команд телекодowego управления с учетом их структуры и содержания, а также быстрое кодирование и восстановление команд за счет заранее сформированных на передающей и приемной сторонах баз данных.

Хорошо известны два основных способа эффективного кодирования символьной информации, в том числе команд управления. Словарный способ кодирования предполагает посимвольный анализ передаваемой информации и создание в процессе кодирования и восстановления информации словарей на передающих и приемной сторонах [1]. Недостатками этого способа являются невысокая степень сжатия информации (обусловленная тем, что словарь строят при сжатии и восстановлении информации, и исходные команды по меньшей мере один раз войдут в массив сжатой информации), невысокая достоверность и низкая информационная безопасность, поскольку не проверяются структура и содержание команд телекодowego управления.

Известны статистические способы сжатия символьной информации, такие как способ Фано – Шеннона, Хаффмена или арифметического кодирования, которые не обеспечивают достаточной степени сжатия команд, поскольку сжатие выполняют для каждого сеанса передачи, который обычно содержит небольшое число команд [2]. Статистические способы генерируют разделимые коды, а команды телекодowego управления передают в информационных пакетах, которые уже разделяют команды. Также в статистических способах кодирования не проверяются структура и содержание команд телекодowego управления.

1. Эффективное кодирование команд управления

В данной работе предлагается эффективное кодирование команд телекодowego управления, при котором для получения кодов формализованных команд отдельно кодируют постоянную и переменную части команд [3]. Постоянную часть команд кодируют с использованием заранее подготовленной базы данных. Команды в базе данных упорядочивают в лексикографическом порядке (по алфавиту), что упрощает и ускоряет их поиск в базе данных. В базу данных команд телекодowego управления помещают индексы (адреса базы данных) команд телекодowego управления и коэффициенты смещения и децимации для нормализации переменной части команд телекодowego управления. Индексы, имеющие меньшую разрядность, присваиваются командам с большей частотой передачи. Частота передачи команд определяется по достаточно большой статистике сеансов телекодowego управления, например 1000 и более сеансов управления. Построение базы команд выполняется заранее с использованием достаточно большой статистики команд. При этом можно использовать все имеющиеся вычислительные ресурсы и наилучшие из известных методов сжатия данных, например арифметическое сжатие с марковским предсказанием [4]. Хорошие результаты показывают адаптивные методы сжатия с предсказанием [5].

Таким образом, базу данных команд телекодowego управления на передающей стороне можно представить в виде

$$BD1 = \{[C_i], [i, \alpha_i, \beta_i]\}, \quad i = 0..n-1, \quad (2)$$

где C_i – постоянная часть i -й команды телекодowego управления; i – индекс команды; α_i, β_i – коэффициенты нормализации, включающие соответственно коэффициент смещения и коэффициент децимации.

Входом $[C_i]$ базы данных команд телекодowego управления является множество постоянных частей команд, а содержимым или выходом $[i, \alpha_i, \beta_i]$ – совокупность соответствующих индексов команд и коэффициентов для нормализации переменной части команды.

Поскольку команды в базе данных упорядочены в лексикографическом порядке, поиск команды целесообразно проводить методом дихотомии (методом деления области поиска пополам). Если команда найдена, то считывают из базы данных индекс i обнаруженной команды и записывают его в массив сжатой информации. Затем считывают из базы данных коэффициенты нормализации α_i и β_i . Нормализацию переменной части команды выполняют с помощью дробно-линейного преобразования по формуле

$$W_i = \frac{V_i - \alpha_i}{\beta_i}, \quad i = 0 \dots n-1. \quad (3)$$

Коэффициент смещения α_i выбирают равным минимальному значению переменной части команды телекодowego управления, а коэффициент децимации β_i определяется необходимой точностью задания переменной части. Полученную величину W_i записывают в массив сжатой информации. Таким образом, массив сжатой информации будет

$$MSI = \{[i], [W_i]\}, \quad i = 0 \dots n-1. \quad (4)$$

Затем сжатую информацию передают по каналу связи на приемную сторону. На приемной стороне восстанавливают постоянную и переменную части команд телекодowego управления. Для этого используют принятый из канала связи массив сжатых команд телекодowego управления и базу данных этих команд, которая содержит те же команды, что и база данных, используемая при сжатии команд, но эти команды расположены по величине кода индексов команд, что упрощает и ускоряет их поиск в базе данных.

Таким образом, база данных команд телекодowego управления на приемной стороне представляется в виде

$$BD2 = \{[i], [C_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i]\}, \quad i = 0 \dots n-1, \quad (5)$$

где γ_i – максимально допустимое значение переменной части i -й по порядку команды телекодowego управления.

Входом базы данных команд на приемной стороне является множество кодов индексов $[i]$ команд, а выходом – множество $[C_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i]$, включающее соответствующую постоянную часть команды C_i , коэффициенты нормализации α_i, β_i и максимально допустимое значение γ_i переменной части команды телекодowego управления.

Постоянную часть команд телекодowego управления C_i получают на выходе базы данных команд, а переменную часть команд вычисляют, используя коэффициенты нормализации α_i и β_i по формуле линейного преобразования:

$$V_i = \beta_i \cdot W_i + \alpha_i, \quad i = 0 \dots n-1. \quad (6)$$

При восстановлении команд телекодowego управления выполняют следующие проверки:

1. Контроль принадлежности индекса i команд телекодowego управления допустимому диапазону значений:

$$i_{\min} \leq i \leq i_{\max}. \quad (7)$$

2. Контроль переменной части V_i команд телекодowego управления, которая не должна превосходить максимально допустимого значения γ_i :

$$V_i \leq \gamma_i. \quad (8)$$

При выполнении этих проверок постоянную и переменную части команд помещают в массив восстановленной информации. При невыполнении проверок в массив восстановленной информации записывают признак стирания команды, и команда считается непринятой.

При большом объеме базы данных индекс команды будет содержать большое число разрядов, что уменьшает сжатие информации. Команды телекодowego управления могут относиться к различным системам управления на приемной стороне. В этом случае целесообразно использовать различные базы данных команд, относящиеся к различным системам управления. Например, БПЛА используют команды телекодowego управления, относящиеся к системам управления полетом, системам управления устройствами наблюдения и видеосъемки, системам управления вооружениями и др. Использование нескольких баз данных, относящихся к различным системам управления, позволяет сократить разрядность индекса баз данных, а значит, сократить объем передаваемой информации. Поэтому во многих случаях целесообразно использование нескольких баз данных команд телекодowego управления для обработки, хранения и передачи команд телекодowego управления.

2. Результаты моделирования

В табл. 1 приведены результаты моделирования сжатия и восстановления команд телекодowego управления при использовании словарного, статистического по алгоритму Хаффмена и предлагаемого способов кодирования. В каждом сеансе связи передавалась одна команда телекодowego управления в своем пакете информации. Число различных передаваемых команд было равно 26 команд. Общий объем баз данных на передающей и приемной сторонах составлял около 3 кБайт. Было передано 1000 команд управления. За счет заранее подготовленных баз данных сложность предлагаемого способа по числу операций будет наименьшей.

Таблица 1

Результаты моделирования сжатия
и восстановления команд телекодowego управления

Показатель	Словарное сжатие	Статистическое сжатие по алгоритму Хаффмена	Предлагаемый способ
Коэффициент сжатия	3,57	3,41	4,26
Сложность кодирования и восстановления команд управления, операций	24	19	8

Рассмотрение результатов моделирования показывает, что предлагаемый способ с использованием заранее подготовленных баз данных обеспечивает наибольшее сжатие команд телекодowego управления. За счет контроля структуры и содержимого команд повышаются достоверность и информационная безопасность команд.

Заключение

Предлагается эффективное кодирование команд телекодowego управления с использованием заранее сформированных на передающей и приемной сторонах специальным образом упорядоченных баз данных команд. Такое кодирование команд обеспечивает степень сжатия информации, большую, чем при использовании словарного и статистического способов сжатия. Сокращение объема передаваемой информации уменьшает вероятность ее искажения и повышает надежность передачи команд телекодowego управления. Проверка структуры и содержания принятых команд позволяет повысить достоверность и информационную безопасность команд.

Библиографический список

1. **Ситняковская, Е. И.** Построение эффективных побуквенных кодов для словарных методов сжатия данных / Е. И. Ситняковская // Проблемы передачи информации. – 1998. – Вып. 2. – С. 47–54.
2. **Ватолин, Д.** Методы сжатия данных / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М. : Диалог МИФИ, 2002. – 384 с.
3. Пат. 2592456 Российская Федерация, МПК H03M 7/30. Способ обработки, хранения и передачи команд телекодowego управления / Квашенников В. В., Занкович А. Ф., Слонков Ю. А. – опубл. 20.07.2016, Бюл. № 20. – 3 с.
4. **Соломон, Д.** Сжатие данных, изображений и звука / Д. Соломон. – М. : Техносфера, 2004. – 368 с.
5. **Cleary, J. G.** Data compression using adaptive coding and partial string matching / J. G. Cleary, I. H. Witten // IEEE Transactions on Communications. – 1984. – Vol. 32 (4). – P. 396–402.

References

1. Sitnyakovskaya E. I. *Problemy peredachi informatsii* [Information transfer issues]. 1998, iss. 2, pp. 47–54.
2. Vatolin D., Ratushnyak A., Smirnov M., Yukin V. *Metody szhatiya dannykh* [Data protection methods]. Moscow: Dialog MIFI, 2002, 384 p.
3. Pat. 2592456 Russian Federation, MPK H03M 7/30. *Sposob obrabotki, khraneniya i peredachi komand telekodovogo upravleniya* [A method of telecode management command processing, storage and transfer]. Kvashennikov V. V., Zankovich A. F., Slonkov Yu. A., publ. 20.07.2016, bull. no. 20, 3 p.
4. Solomon D. *Szhatie dannykh, izobrazheniy i zvuka* [Compression of data, images and sound]. Moscow: Tekhnosfera, 2004, 368 p.
5. Cleary J. G., Witten I. H. *IEEE Transactions on Communications*. 1984, vol. 32 (4), pp. 396–402.

Квашенников Владислав Валентинович

доктор технических наук, старший научный сотрудник, Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств (Россия, г. Калуга, ул. К. Маркса, 4)

E-mail: kniitmu@kaluga.net

Kvashennikov Vladislav Valentinovich

Doctor of engineering sciences, senior staff scientist, Kaluga Research Institute of Telemechanical Devices (4 K. Marxa street, Kaluga, Russia)

Шабанов Александр Константинович

кандидат технических наук, заместитель главного инженера по научно-исследовательским опытно-конструкторским работам, Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств (Россия, г. Калуга, ул. К. Маркса, 4)

E-mail: kniitmu@kaluga.net

Shabanov Aleksandr Konstantinovich

Candidate of engineering sciences, deputy chief engineer for research and development, Kaluga Research Institute of Telemechanical Devices (4 K. Marxa street, Kaluga, Russia)

Зайцев Павел Иванович

заместитель главного конструктора по системным вопросам, Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств (Россия, г. Калуга, ул. К. Маркса, 4)

E-mail: kniitmu@kaluga.net

Zaytsev Pavel Ivanovich

Deputy chief designer for systemic issues, Kaluga Research Institute of Telemechanical Devices (4 K. Marxa street, Kaluga, Russia)

УДК 621.396.96

Квашенников, В. В.

Способ эффективного кодирования команд телекодированного управления / В. В. Квашенников, А. К. Шабанов, П. И. Зайцев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 4 (48). – С. 124–130. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-4-12.

ОБОБЩЕННАЯ КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТИ СВЯЗИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования является распределенная сеть связи (РСС) на пунктах управления различного уровня. Предметом исследования является математическая модель имитации функционирования РСС на пунктах управления различного уровня. Цель работы – представление научно-методического подхода (возможных математических методов) реализации в сформулированной обобщенной комплексной математической модели принципиально новых факторов, учет которых позволит повысить эффективность функционирования РСС на пунктах управления различного уровня.

Материалы и методы. Модель в основном опирается на аксиоматический метод познания. Блок аксиом формируется на основе объективных законов, определяющих форму и тип связи между элементами материальных носителей рассматриваемых процессов.

Результаты. Разработана обобщенная модель РСС, позволяющая учитывать принципиально новые факторы, такие как перемещение элементов (полевых узлов связи и абонентов) РСС, использование РСС телекоммуникационного ресурса систем связи пунктов управления и единой сети электросвязи Российской Федерации, информационное взаимодействие элементов (узлов связи) РСС с системами связи пунктов управления. Модель реализована в виде патента РФ на изобретение.

Выводы. После доведения модели до программной реализации она может применяться при проектировании и разработке РСС, а также при задании требований к основным показателям сложных технических систем, функционирующих на распределенной территории и в учебном процессе высших учебных заведений.

Ключевые слова: распределенная сеть связи, математическая модель, научно-методический подход, функционирование, телекоммуникационный ресурс.

A. S. Belov, V. S. Shumilin, I. D. Kazenov

A GENERALIZED COMPLEX MATHEMATICAL MODEL OF A DISTRIBUTED COMMUNICATION NETWORK

Abstract.

Background. The object of the study is a distributed communication network (DCN) at control points (CP) of various levels. The subject of the study is a mathematical model for simulating the functioning of the DCN at control points of various levels. The work purpose is to present a scientific methodological approach (additional method) to implementation in a generalized complex mathematical model of

fundamentally new factors that make it possible to increase the efficiency of the functioning of the DCN at the CP of various levels.

Materials and methods. The model is mainly based on the axiomatic method of cognition. The block of axioms is formed on the basis of objective laws that determine the form and type of connection between the elements of the material carriers of the processes under consideration.

Results. A generalized DCN model is developed that allows to take into account fundamentally new factors, such as the movement of DCN elements (field nodes and subscribers), the use of the DCN telecommunication resource of communication systems of control points and the unified telecommunications network of the Russian Federation (UTN RF), information interaction of elements nodes of communication) DCN with communication systems of control points. The model is implemented in the form of a patent of the Russian Federation for an invention.

Conclusions. After bringing the model to software implementation, it can be used in the design and development of the DCN, and also, when setting requirements for the main indicators of complex technical systems operating in the distributed territory and in the educational process of higher education institutions.

Keywords: distributed communication network, mathematical model, scientific and methodical approach, functioning, telecommunication resource.

Введение

Развитие мирового сообщества наглядно демонстрирует, что в последнее время критически важным государственным ресурсом и фактором, оказывающим все большее влияние на систему государственного и военного управления, становятся распределенные сети связи (РСС). Существенное увеличение количества и важности задач в интересах государственного и военного управления, решаемых в реальном масштабе времени, обуславливает повышение уровня требований, предъявляемых к РСС. В этих условиях существует необходимость в определении новых научно-методических подходов проектирования и построения РСС с учетом возможного ее комплексирования с системами связи пунктов управления и единой сети электросвязи (ЕСЭ) РФ.

Под РСС понимается техническая основа системы государственного и военного управления, предназначенная для обмена всеми видами информации на пунктах управления (ПУ) различного уровня [1].

Проведенный анализ показал, что существующие научно-методические подходы по математическому (имитационному) моделированию РСС не в полном объеме учитывают современные условия их функционирования. В частности, при моделировании РСС не учитывается ряд факторов: развертывание и функционирование РСС на значительно большей территории, перемещение элементов (узлов связи) РСС, использование телекоммуникационного ресурса систем связи ПУ и ЕСЭ РФ [1–7].

1. Постановка задачи

Необходимо разработать научно-методический подход по моделированию РСС в виде обобщенной блок-схемы, с помощью которого возможно имитировать процессы: развертывания и функционирования РСС, перемещения элементов РСС и абонентов (должностных лиц и мест их размещения и перемещения), использования РСС телекоммуникационного ресурса систем связи ПУ и ЕСЭ РФ, информационного взаимодействия элементов (узлов связи) РСС с техническими средствами ПУ [8–12].

Задача разработки обобщенной блок-схемы математической (аналитико-имитационной) модели РСС включает ряд основных этапов:

- выявление основных параметров, являющихся ключевыми показателями в имитируемой РСС, в том числе входных и выходных параметров;
- установление взаимосвязи между входными и выходными показателями в виде математического описания (использования математических методов);
- определение законов распределения вероятностей для ключевых параметров модели РСС.

2. Основной способ моделирования процессов функционирования распределенной сети связи на ПУ различного уровня

Моделирование процессов функционирования РСС является задачей стохастической, динамической в условиях неопределенности. Такой класс задач возможно решить, используя имитационное моделирование методом Монте-Карло. Метод предполагает разработку моделирующего алгоритма и ряд имитационных прогонов с помощью ЭВМ, причем случайный выбор значений из определенных вероятностных распределений не должен нарушать существования известных или предполагаемых отношений корреляции среди переменных.

Сформулирован способ решения задачи, реализованный в виде обобщенной блок-схемы математической (аналитико-имитационной) модели РСС на ПУ различных уровней управления, представленной на рис. 1 [13], где в блоке 1 задают (вводят) исходные данные, необходимые для развертывания РСС на ПУ различных уровней, а именно: количество узлов связи $[2...S]$, количество линий связи с учетом узлов связи ПУ и ЕСЭ $[1...M]$, количество точек доступа к узлам связи ПУ и ЕСЭ $[1...m]$, среднее время функционирования точек доступа узлов связи ПУ и ЕСЭ $\bar{t}$, количество абонентов $[1...n]$.

В блоке 2 моделируют топологию РСС. При этом топология размещения ее элементов представлена с учетом нескольких N групп элементов. Для каждой группы элементов осуществляется генерация координат районов их размещения. Первую группу составляют элементы РСС, местоположения которых ограничены районами нахождения абонентов. Представление их координат обеспечивается с помощью соотношений:

$$X_{NN}^{(1)} = X_{\min}^{(1)} + (X_{\max}^{(1)} - X_{\min}^{(1)}) D_{0,1}, \quad (1)$$

$$Y_{NN}^{(1)} = Y_{\min}^{(1)} + (Y_{\max}^{(1)} - Y_{\min}^{(1)}) D_{0,1}, \quad (2)$$

где $X_{NN}^{(1)}$, $Y_{NN}^{(1)}$ – координаты элемента РСС соответственно по осям X и Y ; $X_{\max}^{(1)}$, $X_{\min}^{(1)}$ – соответственно максимально и минимально возможное удаление элемента РСС от места нахождения абонента (абонентов) по оси X с учетом воздействующих факторов; $Y_{\max}^{(1)}$, $Y_{\min}^{(1)}$ – соответственно максимально и минимально возможное удаление элемента РСС от места нахождения абонента (абонентов) по оси Y с учетом воздействующих факторов; $D_{0,1}$ – случайное число, распределенное на интервале $[0,1]$, получаемое с помощью датчика случайных чисел.

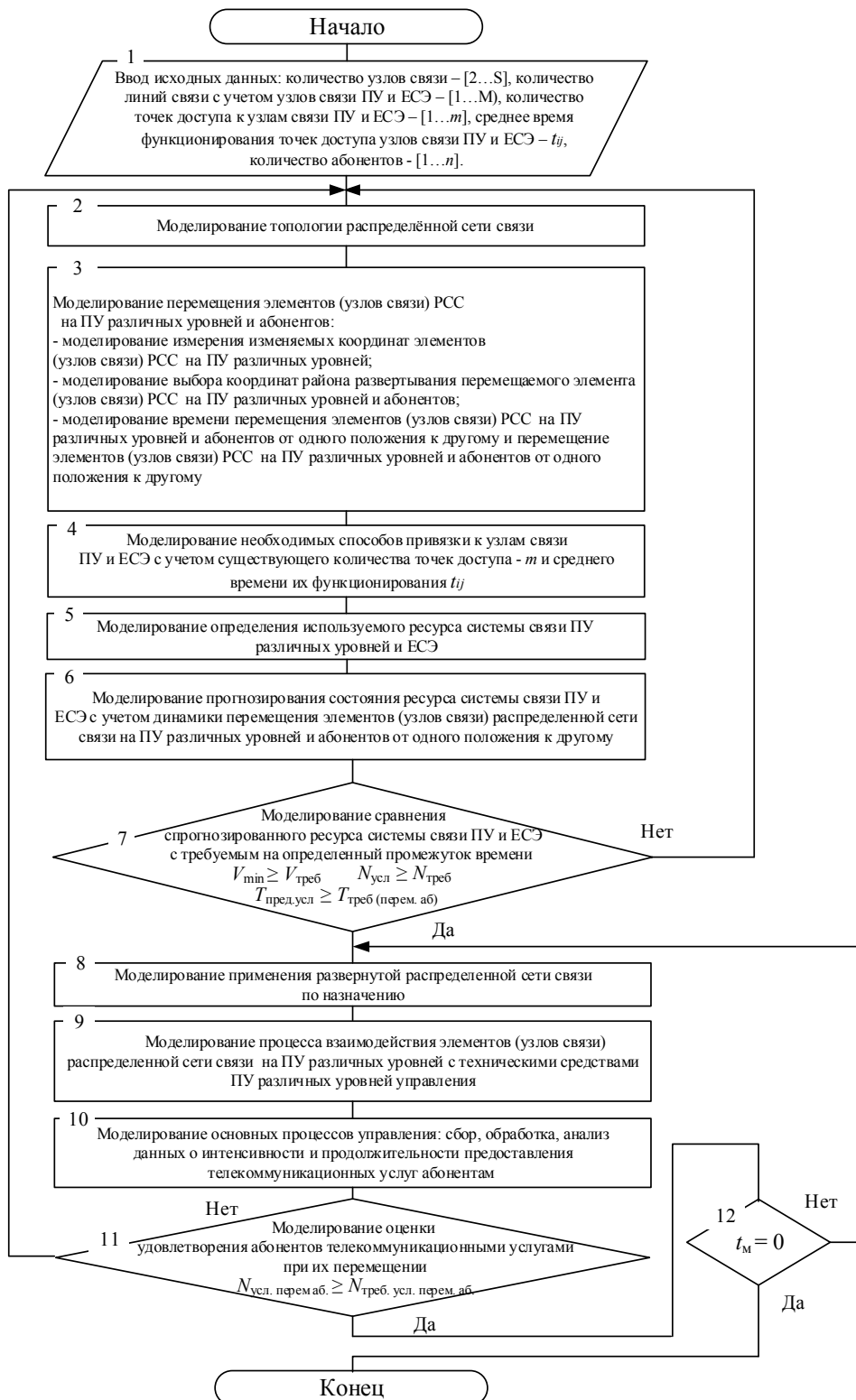


Рис. 1. Обобщенная блок-схема математической модели РСС на ПУ различных уровней управления

Для формирования равномерно распределенных случайных чисел в интервале $[0,1]$ используется мультипликативный конгруэнтный метод:

$$X_{i+1} = \lambda X_i \pmod{M}, \quad i = 0, 1, \dots, \quad (3)$$

где X_0 – произвольное нечетное число, неотрицательное; $\lambda = 8t \pm 3$, t – любое целое положительное лицо; M – значение модуля. При реализации на ПЭВМ $M = p^q$ (p – основание системы счисления; q – число разрядов в случайном числе).

Равномерность распределения достигается методом подбора периодичности длины периода и достижения следующих значений статистических параметров равномерного распределения: $M(t) \approx 0,5$, $D(t) \approx 0,0833$.

Проверка на случайность проводится с помощью совокупности тестов проверки: частот, пар, комбинаций, серий, корреляции.

Ко второй группе относятся элементы РСС, координаты которых зависят от положения элементов РСС первой группы. Имитация их районов размещения осуществляется с помощью выражений:

$$X_{CC}^{(2)} = X_{CC}^{(1)} + \cos \alpha \left[L_{\min}^{(2)} + \left(L_{\max}^{(2)} - L_{\min}^{(2)} \right) D_{0,1} \right], \quad (4)$$

$$Y_{CC}^{(2)} = Y_{CC}^{(1)} + \sin \alpha \left[M_{\min}^{(2)} + \left(M_{\max}^{(2)} - M_{\min}^{(2)} \right) D_{0,1} \right], \quad (5)$$

где $X_{NN}^{(1)}$, $Y_{NN}^{(1)}$ – координаты района развертывания элемента РСС первой группы; $L_{\max}^{(2)}$, $L_{\min}^{(2)}$ – соответственно максимально и минимально возможное удаление элемента РСС второй группы от элемента РСС первой группы по оси X ; $M_{\max}^{(2)}$, $M_{\min}^{(2)}$ – соответственно максимально и минимально возможное удаление элемента РСС второй группы от элемента РСС первой группы по оси Y ; α – угол, определяющий местоположение элемента РСС второй группы относительно элемента РСС первой группы.

Третью группу составляют элементы РСС, местоположение которых взаимосвязано с координатами элементов РСС второй группы.

N -ю группу составляют элементы РСС, местоположение которых коррелировано с координатами элементов РСС $(N-1)$ -й группы. Имитация их районов размещения осуществляется с помощью выражений:

$$X_{CC}^{(N)} = X_{CC}^{(N-1)} + \cos \beta \left[L_{\min}^{(N)} + \left(L_{\max}^{(N)} - L_{\min}^{(N)} \right) D_{0,1} \right], \quad (6)$$

$$Y_{CC}^{(N)} = Y_{CC}^{(N-1)} + \sin \beta \left[M_{\min}^{(N)} + \left(M_{\max}^{(N)} - M_{\min}^{(N)} \right) D_{0,1} \right], \quad (7)$$

где $X_{NN}^{(N-1)}$, $Y_{NN}^{(N-1)}$ – координаты района развертывания элемента РСС $(N-1)$ -й группы; $L_{\max}^{(N)}$, $L_{\min}^{(N)}$ – соответственно максимально и минимально возможное удаление элемента РСС N -й группы от элемента РСС $(N-1)$ -й группы по оси X ; $M_{\max}^{(N)}$, $M_{\min}^{(N)}$ – соответственно максимально и минимально возможное удаление элемента РСС N -й группы от элемента РСС $(N-1)$ -й группы по оси Y ; β – угол, определяющий местоположение элемента РСС N -й группы относительно элемента РСС $(N-1)$ -й группы.

Имитация координат размещения элементов РСС всех групп осуществляется последовательно от групп с наименьшими номерами к группам с наибольшими номерами в порядке возрастания.

Структуры РСС могут быть смоделированы с помощью имитаторов формальных математических моделей каналов связи, основанных на аппарате системных функций [13].

В блоке 3 моделируют перемещение элементов (узлов связи) РСС на ПУ различных уровней и абонентов.

В блоке 3.1 измеряют изменяемые координаты элементов (узлов связи) РСС на ПУ различных уровней.

Исходными данными для измерения изменяемых координат элементов РСС X_{cc} и Y_{cc} (абонентов $X_{аб}$ и $Y_{аб}$) являются параметры движения: скорость движения элемента РСС (скорость перемещения абонентов) v ; курсовой угол Θ движения элемента РСС (абонентов) либо проекции вектора скорости:

$$v_x = v \cdot \cos \Theta, \quad (8)$$

$$v_y = v \cdot \sin \Theta. \quad (9)$$

Измерение изменяемых координат элементов РСС производится по следующим формулам:

$$X_{cc} = v_x t + X_{cc}^{(t_0)}, \quad (10)$$

$$Y_{cc} = v_y t + Y_{cc}^{(t_0)}, \quad (11)$$

где t – время перемещения элемента РСС; $X_{cc}^{(t_0)}$ и $Y_{cc}^{(t_0)}$ – координаты последнего места размещения элемента РСС.

Расчет изменяемых координат для абонентов производится по следующим формулам:

$$X_{аб} = v_x t + X_{аб}^{(t_0)}, \quad (12)$$

$$Y_{аб} = v_y t + Y_{аб}^{(t_0)}, \quad (13)$$

где t_0 – время начала перемещения абонентов; $X_{аб}^{(t_0)}$, $Y_{аб}^{(t_0)}$ – координаты начального местоположения абонентов.

В блоке 3.2 моделируют выбор координат района развертывания перемещаемого элемента (узлов связи) РСС на ПУ различных уровней и абонентов.

Процедура выбора координат района развертывания (остановки) перемещаемого элемента (абонента) РСС носит итерационный характер. При остановлении процедуры выбора координат используют критерий

$$R_{кри,j} \leq R_{\max} \Big|_{t_{\text{обсл}} \leq t_{\text{обсл}}^{\text{гр}}}, \quad (14)$$

где $R_{криj}$ – территориальный разнос между i -м положением перемещаемого элемента (абонента) РСС и j -м положением взаимодействующих с этим эле-

ментом (абонентов) РСС других элементов (абонентов); $R_{\max}$ – максимально возможный территориальный разнос; $t_{\text{обсл}}$ – время своевременности обслуживания абонентов; $t_{\text{обсл}}^{\text{тр}}$ – требуемое время своевременности обслуживания абонентов.

В блоке 3.3 моделируют время перемещения элементов (узлов связи) РСС на ПУ различных уровней и абонентов от одного положения к другому и перемещение элементов (узлов связи) РСС на ПУ различных уровней и абонентов от одного положения к другому.

Имитация значения времени перемещения элемента РСС ВСУ (объекта органов вышестоящего управления) от одного положения к другому осуществляется по формуле

$$t = t_{\text{ср}} \cdot D_{0,1}. \quad (15)$$

В блоке 4 моделируют необходимые способы привязки к узлам связи ПУ и ЕСЭ с учетом существующего количества точек доступа m и среднего времени их функционирования $\bar{t}$ [14].

В блоке 5 моделируют определение используемого ресурса системы связи ПУ различных уровней и ЕСЭ. Одним из основных показателей ресурса системы связи ПУ и ЕСЭ является пропускная способность.

Требования к пропускной способности узла и линии связи задаются количеством сообщений (λ) определенного объема (V) для различных видов связи, которые необходимо передать на каждом из направлений связи с учетом требований по своевременности обслуживания абонентов [15–18].

В блоке 6 моделируют прогнозирование состояния ресурса системы связи ПУ и ЕСЭ с учетом динамики перемещения элементов (узлов связи) РСС на ПУ различных уровней и абонентов от одного положения к другому.

При прогнозировании состояния ресурса системы связи ПУ и ЕСЭ используется метод экстраполяционного сглаживания. Сглаживание возможно производить с помощью многочленов, приближающих по методу наименьших квадратов группы опытных точек. Форма сглаживания является линейной, т.е. используется многочлен первой степени. Например, для сглаживания по трем точкам используют следующие выражения [19–22]:

$$\tilde{y}_0 = \frac{1}{3}(y_{-1} + y_0 + y_{+1}), \quad (16)$$

$$\tilde{y}_{-1} = \frac{1}{6}(5y_{-1} + 2y_0 + y_{+1}), \quad (17)$$

$$\tilde{y}_{+1} = \frac{1}{6}(-y_{-1} + 2y_0 + 5y_{+1}), \quad (18)$$

где $y_0, \tilde{y}_0$ – значения исходной и сглаженной функций в средней точке; $y_{-1}, \tilde{y}_{-1}$ – значения исходной и сглаженной функций в левой точке; $y_{+1}, \tilde{y}_{+1}$ – значения исходной и сглаженной функций в правой точке.

В блоке 7 моделируют сравнение спрогнозированного ресурса системы связи ПУ и ЕСЭ с требуемым на определенный промежуток времени $t + \Delta t$

для обеспечения требуемого объема телекоммуникационного ресурса моделируемой РСС – $V_{\min} \geq V_{\text{треб}}$, необходимого набора предоставляемых телекоммуникационных услуг $N_{\text{усл}} \geq N_{\text{треб}}$ и определенного времени их предоставления – $T_{\text{пред.усл}} \geq T_{\text{треб}}$ (перем.аб) ·

Телекоммуникационные услуги включают услуги магистральных транспортных сетей и высокоскоростных сетей передачи данных, услуги сетей передачи данных, услуги мобильной связи. Эти услуги обеспечивают передачу между абонентами различных видов информации (речь, данные, видеоизображения и т.п.), сопряжение между разнотипным оконечным оборудованием, сервисное обслуживание пользователей.

В случае, если спрогнозированного ресурса системы связи ПУ и ЕСЭ недостаточно для устойчивого функционирования построенной (сформированной) РСС и своевременного обеспечения абонентов требуемым набором телекоммуникационных услуг, осуществляется возврат к блоку 2, где происходит имитация реконфигурации РСС исходя из предъявляемых к ней требований.

Если же ресурса системы связи ПУ и ЕСЭ достаточно, то переходят к блоку 8, где осуществляется имитация применения развернутой (сформированной) РСС по назначению (процесс функционирования).

В блоке 8 моделируют применение РСС по назначению. При этом структура исследуемой сети связи рассматривается как совокупность $\{M\}$ двухполюсных систем. Полюсами в двухполюсных системах в нашем случае являются абоненты [21].

В блоке 9 моделируют процесс информационного взаимодействия элементов (узлов связи) РСС на ПУ различных уровней с техническими средствами ПУ различных уровней управления, при этом [23–26] в части информационного взаимодействия единственной характеристикой каждого n -го ($n = 1, 2, \dots, J_n$) элемента РСС и технического средства ПУ является допустимое время t_{nj} цикла управления абонентом при выполнении j -й задачи. Величина t_{nj} представляет собой время формирования и доведения одного управленческого решения абонентом по выполнению j -й задачи, не снижающее степень реализации возможностей ресурсов подведомственного n -му органу элемента для достижения цели объекта в целом.

Для каждого k -го органа (элемента РСС ПУ различного уровня) информационное взаимодействие с n -м органом (техническим средством ПУ различного уровня) при выполнении j -й задачи характеризуется временем τ_{kn}^j формирования и доведения до n -го органа информации, необходимой для полной реализации возможностей ресурсов n элемента при решении указанной задачи.

Величина τ_{kn}^j определяется соотношением

$$\tau_{kn}^j = \tau_{kn}^{j*} + T_{kn}^j, k, n = 1, 2, \dots, N, k \neq n, j = 1, 2, \dots, J_n, \quad (19)$$

где τ_{kn}^{j*} – номинальное время формирования и доведения от k -го до n -го органа информации, необходимой для полной реализации возможностей n -го

элемента при решении j -й задачи; T_{kn}^j – приращение за счет возможных отказов, сбоев, аварийных повреждений и проведения восстановительных мероприятий, времени формирования и доведения от k -го до n -го органа информации, необходимой для полной реализации возможностей n -го элемента при решении j -й задачи.

В блоке 10 моделируют основные процессы управления: сбор, обработку, анализ данных о интенсивности и продолжительности предоставления телекоммуникационных услуг абонентам [21].

В блоке 11 моделируют оценку удовлетворения абонентов телекоммуникационными услугами при их перемещении:

$$N_{\text{усл.перем.аб}} \geq N_{\text{усл.перем.аб}}^{\text{треб}}.$$

В случае, если абоненты не удовлетворены требуемым набором телекоммуникационных услуг, осуществляется возврат к блоку 2, где происходит имитация реконфигурации РСС исходя из предъявляемых к ней требований. Если же абоненты удовлетворены требуемым набором телекоммуникационных услуг, то переходят к блоку 12, где производят остановку процесса моделирования.

Оценка эффективности разработанного технического решения проводилась путем сравнения достоверности оценки полученных результатов при моделировании основных функций управления [13].

Используя функцию Лапласа

$$P\left(\left|p_{\text{ош}} - p_{\text{ош}}^*\right| < \varepsilon\right) = 2\Phi\left(\frac{\varepsilon\sqrt{N}}{\sqrt{p_{\text{ош}}^*(1-p_{\text{ош}}^*)}}\right), \quad (20)$$

где Φ – функция Лапласа; N – количество моделируемых событий; $p_{\text{ош}}$ – реальное значение оценки; $p_{\text{ош}}^*$ – требуемое значение оценки; ε – величина доверительного интервала, определим достоверность результатов моделирования РСС ВСУ в интересах объектов органов вышестоящего управления, принимая:

$$D = P\left(\left|p_{\text{ош}} - p_{\text{ош}}^*\right| < \varepsilon\right) = 2\Phi\left(\frac{\varepsilon\sqrt{N}}{\sqrt{p_{\text{ош}}^*(1-p_{\text{ош}}^*)}}\right). \quad (21)$$

Перейдем от функции Лапласа к ее аргументу [13]:

$$t_{\alpha} = \frac{\varepsilon\sqrt{N}}{\sqrt{p_{\text{ош}}^*(1-p_{\text{ош}}^*)}}. \quad (22)$$

Тогда

$$t_{\alpha}^2 = \frac{\varepsilon^2 N}{p_{\text{ош}}^*(1-p_{\text{ош}}^*)}. \quad (23)$$

Для случая, когда $p_{\text{ош}}, p_{\text{ош}}^*$ вычислить не удастся, можно воспользоваться упрощенной формулой для допустимого случая $p_{\text{ош}} = p_{\text{ош}}^* = 0,5$, тогда

$$t_{\alpha}^2 = 4\varepsilon^2 N. \quad (24)$$

Определяя $t_{\alpha 1}^2, t_{\alpha 2}^2$ и принимая $\varepsilon = 0,05$ и $N = 6$ для предлагаемой модели, получим оценку эффективности сформулированного теоретического положения:

$$\dot{Y} = \left| \frac{t_{\alpha 1} - t_{\alpha 2}}{t_{\alpha 2}} \right| \cdot 100 = 18 \%. \quad (25)$$

Заключение

С помощью разработанного технического решения возможно моделировать РСС, учитывая ее интеграцию с техническими средствами ПУ различных уровней и ЕСЭ РФ. Комплексное построение формируемой РСС, а также процессы перемещения абонентов по распределенной территории позволяют обеспечить значения ее основных показателей.

Обобщенная комплексная математическая модель реализована в виде Патента РФ на изобретение [13]. После доведения модели до программной реализации она может применяться при проектировании и разработке РСС, а также при задании требований к основным показателям сложных технических систем, функционирующих на распределенной территории и в учебном процессе высших учебных заведений.

Направлениями дальнейшей работы являются:

- проведение компьютерной имитации функционирования РСС;
- расчет основных характеристик (выходных результатов) распределенных выходных показателей;
- проведение анализа полученных результатов и принятие решения.

Библиографический список

1. **Ермишян, А. Г.** Теоретические основы построения систем военной связи в объединениях и соединениях. Ч. 1. Методологические основы построения организационно-технических систем военной связи / А. Г. Ермишян. – СПб. : ВАС, 2005. – 740 с.
2. Модели и алгоритмы интеллектуализации автоматизированного управления диверсификацией деятельности промышленного предприятия / Ю. В. Ведерников, А. Ю. Гарькушев, В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, А. М. Сазыкин // Вопросы оборонной техники. Сер. 16, Технические средства противодействия терроризму. – 2014. – № 5-6. – С. 61–72.
3. Модель оценки эффективности информационного обеспечения применения высокоточного оружия в контртеррористических операциях / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, Д. А. Бажин, А. Ю. Гарькушев, А. М. Сазыкин // Вопросы оборонной техники. Сер. 16, Технические средства противодействия терроризму. – 2015. – № 1-2. – С. 44–53.
4. Основы построения моделей интеллектуализации в системах безопасности / Е. Г. Анисимов, В. Г. Анисимов, Е. М. Богоева, А. Ю. Гарькушев, А. М. Сазыкин //

- Вопросы оборонной техники. Сер. 16, Технические средства противодействия терроризму. – 2014. – № 9-10. – С. 22–27.
5. **Анисимов, В. Г.** Введение в теорию эффективности боевых действий ракетных войск и артиллерии : монография / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, В. А. Самоленков. – М. : Военная академия генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации, 2008. – 180 с.
 6. **Анисимов, Е. Г.** Проблемы управления обеспечением национальной безопасности Российской Федерации / Е. Г. Анисимов, В. Г. Анисимов, Т. Н. Сауренко // Экономика обороны и безопасности и аналитика : сб. ст. ; под общ. ред. д.ф.н. А. Н. Каньшина ; ред.-сост. В. А. Алешин, сост.: Ю. А. Матвиенко, Ф. В. Ниточкин. – М., 2013. – С. 13–17.
 7. Пат. 2507565 Российская Федерация, МПК G06F9100. Способ моделирования процессов двухуровневого управления и система для его осуществления (варианты) / Селифанов В. А. – заявл. 29.02.2012 ; опубл. 20.02.2014.
 8. **Анисимов, Е. Г.** Показатели эффективности межведомственного информационного взаимодействия при управлении обороной государства / Е. Г. Анисимов, В. Г. Анисимов, А. Ю. Гарькушев, А. А. Селиванов // Вопросы оборонной техники. Сер. 16, Технические средства противодействия терроризму. – 2016. – № 7-8 (97–98). – С. 12–16.
 9. Методологические основы построения показателей эффективности контрольной деятельности органов государственной власти / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, Е. М. Богоева, Т. Н. Сауренко, А. Ю. Гарькушев // Вопросы оборонной техники. Сер. 16, Технические средства противодействия терроризму. – 2015. – № 3-4. – С. 17–20.
 10. **Анисимов, В. Г.** Формализация процедуры риск-ориентированного подхода при выполнении государственными органами контрольных функций / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, Е. М. Богоева // Вестник Российской таможенной академии. – 2014. – № 4 (29). – С. 96–102.
 11. Основы теории эффективности боевых действий ракетных войск и артиллерии : монография / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, А. С. Воробьева, Д. П. Гасюк, О. В. Сосюра. – М. : Воениздат, 2003. – 168 с.
 12. Методы и модели оптимизации в управлении развитием сложных технических систем : монография / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, А. В. Анцигин, А. М. Борисов, В. А. Кежаев, Н. И. Свертилов. – СПб. : Политехника, 2004. – 279 с.
 13. Пат. 2631970 Российская Федерация, H04B17/00, G06F9/00. Способ моделирования процессов управления и связи на распределенной территории / Гречишников Е. В., Скубьев А. В., Добрышин М. М., Белов А. С., Анисимов В. Г. – Опубл. 29.09.2017.
 14. Методические положения математического моделирования задач адаптивного распределения дискретных ресурсов при управлении войсками и оружием в режиме реального времени / Е. Г. Анисимов, В. Г. Анисимов, А. Ю. Гарькушев, А. М. Сазыкин // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2016. – № 1 (91). – С. 32–37.
 15. **Алексеев, О. Г.** Марковские модели боя / О. Г. Алексеев, В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов. – М. : Министерство обороны СССР, 1985. – 86 с.
 16. Методика оценивания эффективности функционирования системы управления рисками таможенных органов Российской Федерации / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, Е. М. Богоева, Я. В. Коровина // Крымский научный вестник. – 2016. – № 3 (9). – С. 116–127.
 17. **Анисимов, В. Г.** О некоторых проблемах управления ракетными войсками и артиллерией при огневом поражении противника в операциях // В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов // Военная мысль. – 1997. – № 1. – С. 41–47.

18. **Балясников, В. В.** Модель причинного анализа на основе использования данных об особых ситуациях / В. В. Балясников, Ю. В. Ведерников, В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов // Вопросы оборонной техники. Сер. 16, Технические средства противодействия терроризму. – 2015. – № 1–2. – С. 31–38.
19. Технические средства диагностирования : справочник / под общ. ред. В. В. Ключева. – М. : Машиностроение, 1989. – 672 с.
20. Модели организации и проведения испытаний элементов системы информационного обеспечения применения высокоточных средств / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, Д. А. Бажин, В. В. Барабанов, А. А. Филиппов // Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. – 2015. – № 648. – С. 6–12.
21. Пат. 2012053 Российская Федерация, МПК 5G 06F 15/419 А. Устройство для анализа сетей / Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г., Борисов А. М., Зубачев А. Б., Ячкула Н. И. – № 4953326/24 ; заявл. 04.06.1991 ; опубл. 30.04.1994, Бюл. 28-2000.
22. **Анисимов, В. Г.** Методы оперативного статистического анализа результатов выборочного контроля качества промышленной продукции / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, Л. А. Мартыщенко, Д. В. Шатохин. – СПб. ; Тула : Международная академия информатизации, 2001. – 72 с.
23. Модель динамики показателей взаимодействия федеральных органов государственной власти в сфере национальной безопасности / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, М. Ю. Горбатов, А. Ю. Гарькушев, Т. Н. Сауренко // Вопросы оборонной техники. Сер. 16, Технические средства противодействия терроризму. – 2017. – № 7-8 (109-110). – С. 3–11.
24. **Анисимов, В. Г.** Обобщенный показатель эффективности взаимодействия федеральных органов исполнительной власти при решении задач обеспечения национальной безопасности государства / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов // Вопросы оборонной техники. Сер. 16, Технические средства противодействия терроризму. – 2017. – № 5-6 (107–108). – С. 101–106.
25. Показатели эффективности защиты информации в системе информационного взаимодействия при управлении сложными распределенными организационными объектами / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, П. Д. Зегжда, Т. Н. Сауренко, С. П. Присяжнюк // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2016. – № 4. – С. 140–145.
26. Риск-ориентированный подход к организации контроля в подсистемах обеспечения безопасности информационных систем / В. Г. Анисимов, П. Д. Зегжда, А. Ф. Супрун, Е. Г. Анисимов, Д. А. Бажин // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2016. – № 3. – С. 61–67.

References

1. Ermishyan A. G. *Teoreticheskie osnovy postroeniya sistem voennoy svyazi v ob"edineniyakh i soedineniyakh. Ch. 1. Metodologicheskie osnovy postroeniya organizatsionno-tekhnicheskikh sistem voennoy svyazi* [Theoretical foundations of establishing a military communication system at formations and units. Part 1. Methodological foundations of establishing organizational and technical systems of military communication]. Saint-Petersburg: VAS, 2005, 740 p.
2. Vedernikov Yu. V., Gar'kushev A. Yu., Anisimov V. G., Anisimov E. G., Sazykin A. M. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16, Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Defence technology issues. Series 16. technical means of counteracting terrorism]. 2014, № 5-6, pp. 61–72.
3. Anisimov V. G., Anisimov E. G., Bazhin D. A., Gar'kushev A. Yu., Sazykin A. M. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16, Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Defence technology issues. Series 16. technical means of counteracting terrorism]. 2015, no. 1-2, pp. 44–53.

4. Anisimov E. G., Anisimov V. G., Bogoeva E. M., Gar'kushev A. Yu., Sazykin A. M. *Voprosy oboronnnoy tekhniki. Ser. 16, Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Defence technology issues. Series 16. technical means of counteracting terrorism]. 2014, no. 9-10, pp. 22–27.
5. Anisimov V. G., Anisimov E. G., Samolenkov V. A. *Vvedenie v teoriyu effektivnosti boevykh deystviy raketnykh voysk i artillerii: monografiya* [Introduction into the theory of efficiency of combat operations of missile troops and artillery: monograph]. Moscow: Voennaya akademiya general'nogo shtaba Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii, 2008, 180 p.
6. Anisimov E. G., Anisimov V. G., Saurenko T. N. *Ekonomika oborony i bezopasnosti i analitika: sb. st.* [Defence and security economy and analytics: collected articles]. Moscow, 2013, pp. 13–17.
7. Pat. 2507565 Russian Federation, MPK G06F9100. *Sposob modelirovaniya protsessov dvukhurovnevoogo upravleniya i sistema dlya ego osushchestvleniya (varianty)* [A method of simulating the processes of two-level management and the system of implementation thereof (variants)]. Celifanov V. A., appl. 29.02.2012; publ. 20.02.2014.
8. Anisimov E. G., Anisimov V. G., Gar'kushev A. Yu., Selivanov A. A. *Voprosy oboronnnoy tekhniki. Ser. 16, Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Defence technology issues. Series 16. technical means of counteracting terrorism]. 2016, no. 7-8 (97–98), pp. 12–16.
9. Anisimov V. G., Anisimov E. G., Bogoeva E. M., Saurenko T. N., Gar'kushev A. Yu. *Voprosy oboronnnoy tekhniki. Ser. 16, Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Defence technology issues. Series 16. technical means of counteracting terrorism]. 2015, no. 3-4, pp. 17–20.
10. Anisimov V. G., Anisimov E. G., Bogoeva E. M. *Vestnik Rossiyskoy tamozhennoy akademii* [Bulletin of Russian Customs Academy]. 2014, no. 4 (29), pp. 96–102.
11. Anisimov V. G., Anisimov E. G., Vorob'eva A. S., Gasyuk D. P., Sosyura O. V. *Osnovy teorii effektivnosti boevykh deystviy raketnykh voysk i artillerii: monografiya* [Foundations of the theory of efficiency of combat operations of missile troops and artillery: monograph]. Moscow: Voenizdat, 2003, 168 p.
12. Anisimov V. G., Anisimov E. G., Antsigin A. V., Borisov A. M., Kezhaev V. A., Svertilov N. I. *Metody i modeli optimizatsii v upravlenii razvitiem slozhnykh tekhnicheskikh sistem: monografiya* [Methods and models of optimization in the management of complex technical systems development: monograph]. Saint-Petersburg: Politehnika, 2004, 279 p.
13. Pat. 2631970 Russian Federation, H04B17/00, G06F9/00. *Sposob modelirovaniya protsessov upravleniya i svyazi na raspredelennoy territorii* [A method of simulating management and communication processes in a distributed territory]. Grechishnikov E. V., Skub'ev A. V., Dobryshin M. M., Belov A. S., Anisimov V. G., publ. 29.09.2017.
14. Anisimov E. G., Anisimov V. G., Gar'kushev A. Yu., Sazykin A. M. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk* [Proceedings of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences]. 2016, no. 1 (91), pp. 32–37.
15. Alekseev O. G., Anisimov V. G., Anisimov E. G. *Markovskie modeli boya* [Markov combat models]. Moscow: Ministerstvo oborony SSSR, 1985, 86 p.
16. Anisimov V. G., Anisimov E. G., Bogoeva E. M., Korovina Ya. V. *Krymskiy nauchnyy vestnik* [Crimean scientific bulletin]. 2016, no. 3 (9), pp. 116–127.
17. Anisimov V. G., Anisimov E. G. *Voennaya mysl'* [Military thought]. 1997, no. 1, pp. 41–47.
18. Balyasnikov V. V., Vedernikov Yu. V., Anisimov V. G., Anisimov E. G. *Voprosy oboronnnoy tekhniki. Ser. 16, Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Defence technology issues. Series 16. technical means of counteracting terrorism]. 2015, no. 1–2, pp. 31–38.

19. *Tekhnicheskie sredstva diagnostirovaniya: spravochnik* [Technical diagnostic means: handbook]. Ed. by V. V. Klyuev. Moscow: Mashinostroyeniye, 1989, 672 p.
20. Anisimov V. G., Anisimov E. G., Bazhin D. A., Barabanov V. V., Filippov A. A. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii im. A. F. Mozhayskogo* [Proceedings of Military Space Academy named after A.F. Mozhayskiy]. 2015, no. 648, pp. 6–12.
21. Pat. 2012053 Russian Federation, MPK 5G 06F 15/419 A. *Ustroystvo dlya analiza setey* [A device for network analysis]. Anisimov V. G., Anisimov E. G., Borisov A. M., Zubachev A. B., Yachkula N. I. № 4953326/24; appl.04.06.1991; publ. 30.04.1994, bull. 28-2000.
22. Anisimov V. G., Anisimov E. G., Martyshechenko L. A., Shatokhin D. V. *Metody operativnogo statisticheskogo analiza rezul'tatov vyborochnogo kontrolya kachestva promyshlennoy produktsii* [Methods of prompt statistical analysis of sampling quality results for industrial products]. Saint-Petersburg; Tula: Mezhdunarodnaya akademiya informatizatsii, 2001, 72 p.
23. Anisimov V. G., Anisimov E. G., Gorbato M. Yu., Gar'kushev A. Yu., Saurenko T. N. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16, Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Defence technology issues. Series 16. technical means of counteracting terrorism]. 2017, no. 7-8 (109-110), pp. 3–11.
24. Anisimov V. G., Anisimov E. G. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16, Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Defence technology issues. Series 16. technical means of counteracting terrorism]. 2017, no. 5-6 (107–108), pp. 101–106.
25. Anisimov V. G., Anisimov E. G., Zegzhda P. D., Saurenko T. N., Prisyazhnyuk S. P. *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy* [Information security issues. Computer systems]. 2016, no. 4, pp. 140–145.
26. Anisimov V. G., Zegzhda P. D., Suprun A. F., Anisimov E. G., Bazhin D. A. *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy* [Information security issues. Computer systems]. 2016, no. 3, pp. 61–67.

Белов Андрей Сергеевич

кандидат военных наук, доцент,
докторант научно-исследовательского
центра, Михайловская военная
артиллерийская академия (Россия,
г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 22)

E-mail: andrej2442016@yandex.ru

Belov Andrey Sergeevich

Candidate of military sciences, associate
professor, doctoral student of the research
center, Mikhailovskaya Military Artillery
Academy (22 Komsomola street,
Saint-Petersburg, Russia)

Шумилин Вячеслав Сергеевич

сотрудник, Академия Федеральной
службы охраны Российской Федерации
(Россия, г. Орел,
ул. Приборостроительная, 35)

E-mail: v-shumilin@mail.ru

Shumilin Vyacheslav Sergeevich

Associate, Academy of Federal Guard
Service of the Russian Federation
(35 Priborostroitelnaya street, Orel, Russia)

Казенов Иван Дмитриевич

адъюнкт, научно-исследовательский
центр, Михайловская военная
артиллерийская академия (Россия,
г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 22)

E-mail: kazenov777@gmail.com

Kazenov Ivan Dmitrievich

Postgraduate student, research center,
Mikhailovskaya Military Artillery
Academy (22 Komsomola street,
Saint-Petersburg, Russia)

УДК 621.391

Белов, А. С.

Обобщенная комплексная математическая модель распределенной сети связи / А. С. Белов, В. С. Шумилин, И. Д. Казенов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 4 (48). – С. 131–145. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-4-13.

Вниманию авторов!

Редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения, а также обзорные статьи по тематике журнала.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows (тип файла – RTF, DOC).

Необходимо представить статью в электронном виде (VolgaVuz@mail.ru) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах. Оптимальный объем рукописи 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt через полуторный интервал. Статья **обязательно** должна содержать индекс УДК, ключевые слова и развернутую аннотацию объемом от 100 до 250 слов, имеющую четкую структуру **на русском** (Актуальность и цели. Материал и методы. Результаты. Выводы) **и английском языках** (Background. Materials and methods. Results. Conclusions).

Обращаем внимание авторов на то, что в соответствии с этическим кодексом журнала для обеспечения единообразия перевод фамилии, имени, отчества каждого автора на английский язык (в сведениях об авторах и списке литературы) осуществляется автоматически с использованием программы транслитерации в кодировке BGN (сайт translit.ru).

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными подписями.

Формулы в тексте статьи **обязательно** должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Word Equation (версия 3.0) или MathType. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

В списке литературы **нумерация источников** должна соответствовать **очередности ссылок** на них в тексте ([1], [2], ...). Номер источника указывается в квадратных скобках. **Требования к оформлению списка литературы** на русские и иностранные источники: **для книг** – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц; **для журнальных статей, сборников трудов** – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, страницы; **для материалов конференций** – фамилия и инициалы автора, название статьи, название конференции, город, издательство, год, страницы.

К материалам статьи **должна** прилагаться следующая информация: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, место и юридический адрес работы (на русском и английском языках), e-mail, контактные телефоны (желательно сотовые).

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается. Рукопись, полученная редакцией, не возвращается. Редакция оставляет за собой право проводить редакционную и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.

Уважаемые читатели!

Для гарантированного и своевременного получения журнала «**Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки**» рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год по тематике:

- **информатика**
- **вычислительная техника**
- **управление**
- **электроника**
- **измерительная техника**
- **радиотехника**
- **машиностроение**
- **машиноведение**

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс/тел. (841-2) 36-84-87. E-mail: VolgaVuz@mail.ru

Подписку можно также оформить по объединенному каталогу «Пресса России» тематические разделы «Компьютеры. Информатика. Программные продукты», «Машиностроение», «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов». Подписной индекс – 36949.

ЗАЯВКА

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 20__ г.

№ 1 – _____ шт., № 2 – _____ шт., № 3 – _____ шт., № 4 – _____ шт.

Наименование организации (полное) _____

ИНН _____ КПП _____

Почтовый индекс _____

Республика, край, область _____

Город (населенный пункт) _____

Улица _____ Дом _____

Корпус _____ Офис _____

ФИО ответственного _____

Должность _____

Тел. _____ Факс _____ E-mail _____

Руководитель предприятия _____
(подпись) (ФИО)

Дата «__» _____ 20__ г.