

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



4(41)/2009

Учредитель

ОАО «Издательство «Политехника»»

Главный редактор

М. Б. Сергеев,
доктор технических наук, профессор

Зам. главного редактора

Г. Ф. Мощенко

Редакционный совет:

Председатель А. А. Оводенко,
доктор технических наук, профессор
В. Н. Васильев,
доктор технических наук, профессор
В. Н. Козлов,
доктор технических наук, профессор
Ю. Ф. Подоплекин,
доктор технических наук, профессор
Д. В. Пузанков,
доктор технических наук, профессор
В. В. Симаков,
доктор технических наук, профессор
А. Л. Фрадков,
доктор технических наук, профессор
Л. И. Чубраева,
доктор технических наук, профессор, чл.-корр. РАН
Р. М. Юсупов,
доктор технических наук, профессор, чл.-корр. РАН

Редакционная коллегия:

В. Г. Анисимов,
доктор технических наук, профессор
Е. А. Крук,
доктор технических наук, профессор
В. Ф. Мелехин,
доктор технических наук, профессор
А. В. Смирнов,
доктор технических наук, профессор
В. И. Хименко,
доктор технических наук, профессор
А. А. Шалыто,
доктор технических наук, профессор
А. П. Шепета,
доктор технических наук, профессор
З. М. Юлдашев,
доктор технических наук, профессор

Редактор: А. Г. Ларионова

Корректор: Т. В. Звертановская

Дизайн: А. Н. Колешко, М. Л. Черненко

Компьютерная верстка: С. В. Барашкова

Ответственный секретарь: О. В. Муравцова

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ
Тел.: (812) 494-70-44
Факс: (812) 494-70-18
E-mail: 80x@mail.ru; ius@aanet.ru
Сайт: www.i-us.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогам: «Роспечать»: № 48060, № 15385; «Пресса России»: № 42476.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Отпечатано с готовых диалозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП.
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

© Коллектив авторов, 2009

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

Артемченко Ю. Н., Городецкий А. Е., Дубаренко В. В., Дорошенко М. С., Кучмин А. Ю. Проблемы обработки и передачи информации в локальной вычислительной сети системы управления радиотелескопа 2
Бестугин А. Р., Шаталова В. А. Статистические характеристики многомерных адаптивных фильтров-ортогонализаторов 9

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Шереметов Л. Б. Децентрализованное управление адаптивными сетями поставок на основе теории коллективного интеллекта и агентной технологии. Часть 1: Модель сети поставок 13

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Тимофеев К. И., Астафуров А. А., Шалыто А. А. Наследование авторматных классов с использованием динамических языков программирования (на примере языка RUBY) 21

КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

Молдовяну П. А., Молдовян Н. А., Дернова Е. С., Костина А. А. Гомоморфизм конечных групп векторов малой размерности и синтез схем цифровой подписи 26

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

Савищенко Н. В. Помехоустойчивость когерентного приема сигналов двоичной амплитудно-фазовой модуляции при неидеальной синхронизации (Часть 2) 33

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАЗОВАНИЕ

Васильев А. Е., Криушов А. В., Шилов М. М. Инструментальные средства и методология подготовки специалистов в области встраиваемых интеллектуальных систем управления 43

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Белобородова Н. А. Генетический алгоритм поиска оптимального варианта роста производства в экономике муниципального образования 53
Рзаев Р. Р., Алиев Э. Р. Агрегированная оценка работы служащих компании методом нечеткого вывода 59

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Баженов А. В., Афонин И. Е. Способ радиолокационного разрешения групповой воздушной цели 68
Краснова А. И., Падерно П. И., Балхарет А. А. Модель оценки времени выполнения задачи в зависимости от изменения напряженности деятельности оператора 72

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Шалыто А. А., Царев Ф. Н. Небывалая победа российской школы программирования! 75
Стемпковский А. Л. XII Международная конференция DATE 2009 76
VIII Всероссийская научно-практическая конференция «ИТММ-2009» 77

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

78

АННОТАЦИИ

83

УДК 629.735.33

ПРОБЛЕМЫ ОБРАБОТКИ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В ЛОКАЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА

Ю. Н. Артеменко,

канд. техн. наук, заведующий отделом
Астрокосмический центр ФИАН

А. Е. Городецкий,

доктор техн. наук, профессор

В. В. Дубаренко,

доктор техн. наук, профессор

М. С. Дорошенко,

младший научный сотрудник

А. Ю. Кучмин,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник
Институт проблем машиноведения РАН

Рассматриваются возможные варианты архитектуры локальной вычислительной сети для реализации алгоритмов управления зеркальной системы крупного полноповоротного радиотелескопа миллиметрового диапазона радиоволн.

Ключевые слова — радиотелескоп, система управления, локально-вычислительная сеть, системы реального времени.

Введение

Развитие современной радиоастрономии в миллиметровом диапазоне радиоволн и дальней космической связи возможно лишь на основе создания крупногабаритных прецизионных и полностью автоматизированных антенных комплексов, способных работать в широком диапазоне частот с практически полным обзором небесной сферы. Этим требованиям в наибольшей степени отвечают полноповоротные зеркальные радиотелескопы (РТ), обеспечивающие получение больших коэффициентов усиления и высокой разрешающей способности. Это позволяет принимать радиоизлучения небесных объектов (в Солнечной системе, Галактике и Метагалактике) и исследовать их характеристики: координаты источников, пространственные структуры, интенсивности излучений, спектры и поляризации.

Проблемы управления большими радиотелескопами и методы их решения, а также структура антенного комплекса рассматривались на примере радиотелескопа РТ-70 [1].

В данной статье описываются возможные варианты архитектуры локальной вычислительной сети (ЛВС) для реализации алгоритмов управления элементами радиотелескопа.

Постоянное повышение требований к точности наведения и разрешающей способности РТ миллиметрового диапазона приводит к необходимости использовать более сложные и трудоемкие в вычислительном плане алгоритмы обработки информации и более скоростные каналы передачи информации. Согласно международному опыту, архитектуры систем управления подобными объектами имеют вид многопроцессорной распределенной ЛВС.

Теория и практика применения средств вычислительной техники в системах управления в последнее время наталкиваются на предельные возможности ведения процесса управления в реальном времени с использованием традиционных вычислителей фоннеймановского типа. В настоящее время эта проблема решается путем использования параллельных вычислений и алгоритмов типа «Поток данных». Следовательно, ЛВС

радиотелескопа неизбежно будет содержать компьютеры как классических архитектур, так и нейрокомпьютеры, матричные и др. Вопросы организации параллельных вычислений в указанной сети вычислительным управляющим комплексом (ВУК) и синхронизации обмена информацией между ее удаленными подсистемами являются актуальными.

Радиотелескоп РТ-70 [1], сочетающий основные характеристики крупных радиотелескопов, имеет зеркальную систему по схеме Грегори и представляет собой вариант двухзеркальной антенны с главным зеркалом (ГЗ) параболической формы диаметром 70 м и эллипсоидным контррефлектором (КР). Контррефлектор устанавливается за первичным фокусом, что дает возможность работать из первичного фокуса, не снимая вторичное зеркало. По схеме Грегори строятся лишь длиннофокусные двухзеркальные антенны, в которых к тому же требуется более высокая точность исполнения КР. Длиннофокусные системы также в значительной степени чувствительны к деформациям ГЗ и взаимному положению ГЗ и КР. Излучение от КР фокусируется в тонкий луч и собирается рупорным облучателем с малым углом раскрытия, что обеспечивает более эффективный прием излучения.

Поверхность ГЗ РТ образована щитами трапециевидной формы, максимальный размер которых $2,5 \times 2$ м, общее число щитов 1188 шт. 14 типоразмеров. Щиты имеют специальную конструкцию, позволяющую проводить предварительную юстировку отражающей поверхности в среднем в 50 точках со среднеквадратическим отклонением лучше 50 мкм. Для обеспечения работы РТ в коротковолновой части миллиметрового диапазона форма поверхности ГЗ должна сохраняться во время наблюдений при действии гравитационных, тепловых и ветровых деформаций с точностью 50–70 мкм. С этой целью каждый щит по углам устанавливается на специальных электродомкратах, которые крепятся на ферменном каркасе РТ (как на 100-метровом GBT в США и 50-метровом GТМ в Мексике). Число электродомкратов 1440 шт. Во время наблюдений системой управления отслеживается положение каждого щита и при необходимости регулируется их взаимное положение для создания оптимальной формы отражающей поверхности ГЗ (адаптивный метод). Предполагается, что в диапазоне 6 см – 8 мм форма отражающей поверхности будет сохраняться только благодаря использованию гомологического принципа построения ферменного каркаса антенны, а на более коротких волнах необходимо использовать адаптивный метод.

Компенсация изменения фокусного расстояния и положения фокальной оси при наведении

по углу места производится автоматически путем линейного и углового перемещения КР таким образом, чтобы фазовые искажения в раскрыве, вызываемые этим перемещением, полностью компенсировали фазовые искажения, вызываемые деформацией ГЗ. Контррефлектор оснащен пятиступенным приводом, позволяющим КР перемещаться по трем линейным и двум угловым координатам.

Для компенсации ошибок наведения ГЗ и КР предлагается использовать приемник, установленный на подвижную платформу, перемещаемую шестью толкателями. Каждый толкатель состоит из штанги, электродвигателя и шарикоподшипникового винтового домкрата, позволяющего изменять длину толкателя посредством выдвигания штанги. Платформа приемника имеет 5 степеней свободы.

Измерительная система (ИС) состоит из трех уровней:

- система первого уровня обеспечивает периодическую калибровку датчиков гиросtabilизированной платформы по азимуту;

- система второго уровня определяет угловое положение опорного кольца (промежуточной базы) относительно трехосной гиросtabilизированной платформы;

- компоненты системы третьего уровня размещены на опорном кольце в вершине основного зеркала и включают две отдельные подсистемы: первая определяет координаты точек поверхности основного зеркала и является первичным звеном системы адаптации поверхности, вторая измеряет положение КР. Каждая подсистема состоит из однотипных измерительных каналов, реализующих метод «угловой засечки».

Для реализации систем первого и второго уровней используются оптико-электронные автоколлимационные угломеры.

Структура системы управления

Система управления радиотелескопа строится как многоуровневая распределенная система [1, 2]. На нижнем (исполнительном) и среднем уровнях система должна функционировать под управлением операционной системы реального времени, а на верхнем — операционной системы общего назначения.

Верхний уровень содержит сетевой сервер, имеющий выход в Internet, кластер, реализующий модели опорно-поворотного устройства РТ [3] и конечно-элементные вычисления параметров зеркальной системы, кластер для вычисления параметров электромагнитного поля в зоне приема и кластер для восстановления изображений космических источников радиоизлучения

и их экспертных оценок для определения поправок на управление.

Средний уровень содержит групповой регулятор подвижных щитов с программным блоком и блоком коррекции, групповой регулятор основного зеркала с программным блоком и блоком коррекции, групповой регулятор контррефлектора с программным блоком и блоком коррекции, групповой регулятор адаптивной платформы облучателя (АПО) [4] с программным блоком, блоком коррекции и блоком формирования сигналов сканирования, а также 3 измерительно-вычислительных комплекса (ИВК):

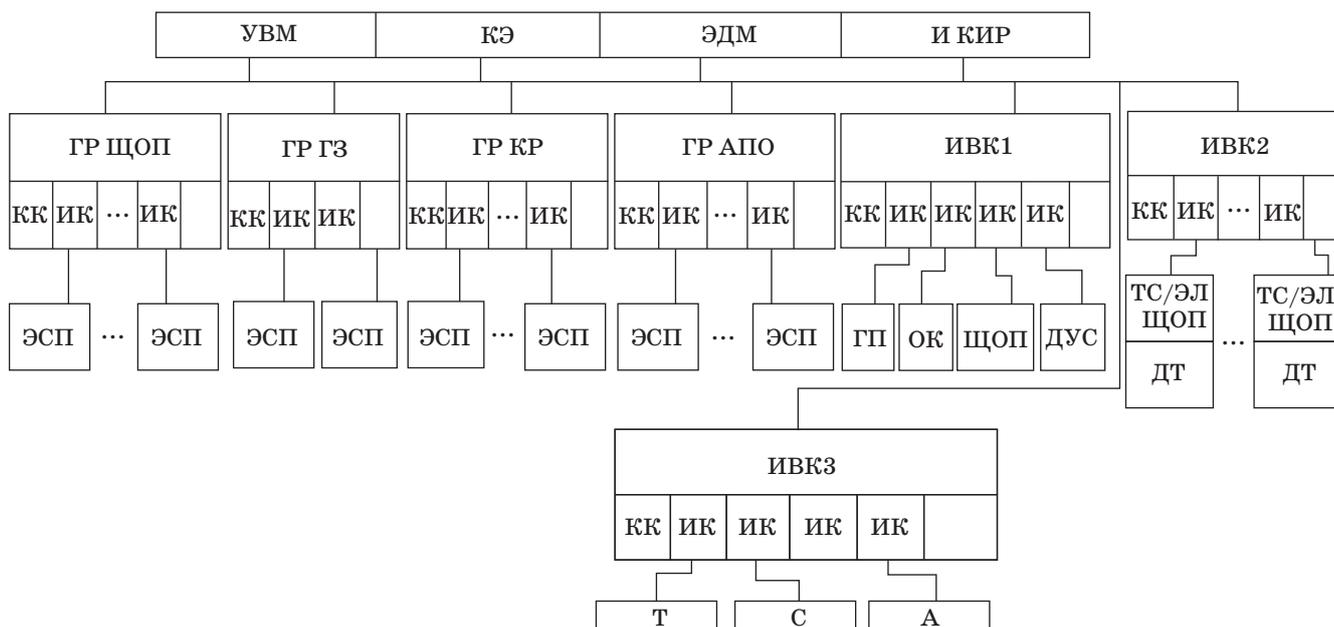
- ИВК1 содержит измерительные каналы опорного кольца, щитов отражающей поверхности ГЗ, датчиков угловых скоростей и гироскопической платформы;
- ИВК2 содержит 10 измерительных каналов телевизионной системы, совмещенной с управлением электроприводами щитов отражающей поверхности, а также датчики контроля температуры, установленные на щитах;
- ИВК3 содержит измерительные каналы юстировочной системы, сейсмографа, термогигробарометра и анеморумбографа.

Нижний уровень содержит контроллеры электросиловых приводов актуаторов подвижных щитов, угла места и азимута ГЗ, перемещения КР и перемещения АПО с соответствующими датчиками обратной связи, а также контроллеры измерительных каналов ИВК. Обобщенная структура системы управления (рис. 1) включает: УВМ — управляющую вычислительную машину с выходом в Internet; КЭ — кластер для

конечно-элементного вычисления параметров зеркальной системы РТ; ЭДМ — кластер для вычисления параметров электромагнитного поля в зоне приема; И КИР — кластер для восстановления изображений космических источников радиоизлучения и их экспертных оценок для определения поправок на управление; ГР ЩОП — групповой регулятор щитов отражающей поверхности, управляет электроприводами щитов, включает коррекцию; ГР ГЗ — групповой регулятор главного зеркала, задает углы места и азимута положения главного зеркала, включая коррекцию; ГР КР — групповой регулятор контррефлектора; ГР АПО — групповой регулятор адаптивной платформы облучателя, имеющий структуру, аналогичную ГР КР [2]; ИВК1–3 — информационно-вычислительные комплексы; ГП решает логическую задачу в определении последовательности управления щитами; КК — контроллеры каналов; ИК — измерительные каналы; ЭСП — электросиловые приводы; ДТ — датчики температуры.

Основными режимами работы системы автоматического наведения РТ на космический источник радиоизлучения являются:

- запись весовых поправок;
- обучение экспертной системы по сигналам от известных мощных КИР;
- калибровка или запись шума вблизи исследуемого КИР;
- наведение на исследуемый КИР;
- слежение за исследуемым КИР;
- сканирование в зоне исследуемого КИР;
- поиск неизвестных КИР в заданной зоне;



■ Рис. 1. Обобщенная структура системы управления

— приведение основного зеркала в заштырирование.

Таким образом, система управления РТ на аппаратном уровне содержит разнородное (управляющее, измерительное, сетевое, информационное и др.) оборудование с разными интерфейсами и должна обеспечивать решение сложных измерительных, вычислительных и логических задач, связанных с управлением и адаптацией зеркальной системы данного РТ.

Архитектура локальной вычислительной сети

Опыт создания подобных систем управления [1, 4] показывает, что для обеспечения рассмотренных режимов работы системы управления РТ миллиметрового диапазона необходимо обеспечить параллельную работу различных управляющих вычислительных подсистем в режиме реального времени. Поэтому при выборе архитектуры ЛВС данной системы необходимо учитывать следующие общие требования:

- высокое быстродействие и синхронизация вычислений и обменов информацией между подсистемами;
- адаптируемость — обеспечение возможности к расширению и модификации локальной сети без глобального изменения состава и архитектуры аппаратно-программных средств;

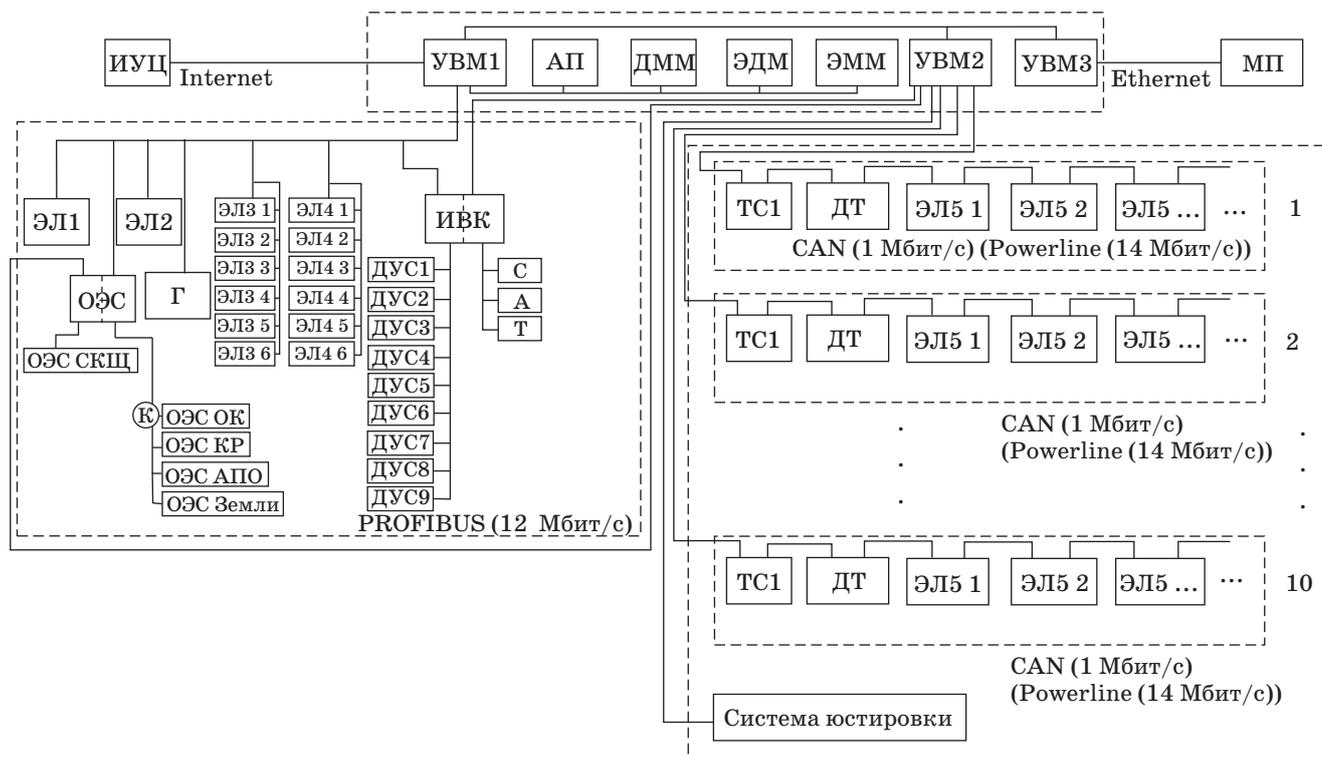
• надежность — свойство локальной сети сохранять полную или частичную работоспособность вне зависимости от выхода из строя некоторых узлов или конечного оборудования.

Анализ режимов управления РТ миллиметрового диапазона [2] показывает, что их ЛВС можно разбить на две связанные между собой на верхнем уровне части (подсети), имеющие различные временные циклы обмена информацией.

В первую подсеть входят ИВК1 и датчики угловых скоростей. Основываясь на требованиях для наиболее быстродействующего привода АПО, который должен обрабатывать воздействия с частотами 2,5 и 5 Гц, можно провести расчет необходимой скорости для этой подсети и выбрать нужный интерфейс.

Подсеть должна работать с задержкой не более 10 % от частоты колебаний АПО, что равно 0,02 с. Самое большое количество информации будет проходить по каналу обмена сооптико-электронной системой (ОЭС) и равняться $6 \times 16 \times 3 + 2 \times 16 = 320$ битам (с трех устройств поступает по 6 координат с разрядностью 16 + 2 координаты с Земли). Следовательно, будет передаваться 320 бит в 0,02 с, что равно 16 000 бит/с или 2000 Б/с. Подходящий интерфейс — PROFIBUS.

Вторая подсеть включает в себя ИВК2 и остальные датчики из ИВК3. Для уменьшения нагрузки данную подсеть целесообразно разделить на 10 секторов, каждый из которых включает в себя



■ Рис. 2. Архитектура локальной вычислительной сети

160 актуаторов и 20 телевизионных систем. Выбор интерфейса для этой подсети основывается на 8-минутном цикле, это значит, что сеть должна обеспечить передачу информации за 0,8 мин. Итак, количество точек на каждом секторе — 180, разрядность слов данных — 8, следовательно, объем информации равен $8 \times 20 \times 3 + 160 \times 8 = 1760$ бит или 220 Б. В итоге, обязательное условие сети — обеспечить передачу 220 Б за 7,5 с, что равно 30 Б/с. Для этой задачи можно использовать интерфейс CAN, однако, для уменьшения количества проводов также можно рассмотреть вариант PowerLine. Технология PowerLine позволяет использовать одни и те же провода для передачи как информации, так и питания, при этом следует избегать высокого напряжения или большого количества одновременных активных подключений, так как это может вызвать помехи в радиоканале.

Итак, для ЛВС РТ вполне подходят следующие сетевые интерфейсы:

- PowerLine — скорость передачи данных до 12 Мбит/с (делится на количество объектов), обеспечивает связь по электропроводке;
- PROFIBUS — скорость обмена прямо зависит от длины сети и варьируется от 100 Кбит/с на расстоянии 1200 м до 12 Мбит/с на дистанции до 100 м;
- CAN — максимальная скорость передачи данных составляет 1 Мбит/с при длине сети 40 м и около 40 Кбит/с при длине сети 1000 м;
- Ethernet.

В соответствии с вычислениями архитектура ЛВС радиотелескопа строится по типу «толстое дерево» (рис. 2), где: ЭЛ1 — электропривод азимута; ЭЛ2 — электропривод угла места; ЭЛ3 — электропривод АПО; ЭЛ4 — электропривод контррефлектора; ЭЛ5 — электропривод щитов главного зеркала; ОЭС — оптико-электронная система; Г — гироскоп; ТС — телевизионная система; ИУЦ — информационно-управляющий центр; УВМ1–3 — управляющие вычислительные машины; ЭДМ — электродинамическая модель; ЭММ — электромагнитная модель; АП — аппроксимирующий параболоид; ДММ — динамическая модель механики; ОК — опорное кольцо; ДУС — датчик угловых скоростей; С — сейсмограф; Т — термогигробарометр; А — анеморумбограф; СКЩ — система контроля щитов; МП — матричный приемник; ДТ — датчик температуры (по 4 на каждый сектор ГЗ).

Особенности построения программного обеспечения

Программное обеспечение подобных сложных систем управления обычно имеет следующую иерархическую структуру.

На нижнем уровне располагается системное программное обеспечение, в роли которого выступает операционная система реального времени, например QNX, либо другая UNIX-подобная система. Далее идет API (интерфейс программирования приложений), представляющий собой набор функций, позволяющих связать операционную систему с прикладным программным обеспечением (ППО), верхним уровнем которого являются:

- управляющие программы;
- прогнозирующие модели;
- статистическая обработка;
- графические интерфейсы;
- экспертные системы.

Очевидно, что при использовании UNIX и, следовательно, API этой операционной системы все ППО строится по принципу объектно-ориентированного программирования и представляет собой программные модули, подключаемые к ядру операционной системы. Для создания ППО целесообразно использовать программные средства выбранной системы, в данном случае, например, возможности языка C++. Использование UNIX-систем или иных систем реального времени подразумевает параллельные вычисления для существенного повышения быстродействия исполняемых программ путем распределения задач на разные вычислительные устройства.

Рассмотрим подробнее методы и средства параллельных вычислений.

Параллельные вычисления существуют в нескольких формах: параллелизм на уровне битов, параллелизм на уровне инструкций, параллелизм данных, параллелизм задач.

Классификация параллельных архитектур по Флинну (M. Flynn):

- вычислительная система с одним потоком команд и данных (однопроцессорная ЭВМ — SISD, Single Instruction stream over a Single Data stream);
- вычислительная система с общим потоком команд (SIMD, Single Instruction, Multiple Data — одиночный поток команд и множественный поток данных);
- вычислительная система со множественным потоком команд и одиночным потоком данных (MISD, Multiple Instruction Single Data — конвейерная ЭВМ);
- вычислительная система со множественным потоком команд и данных (MIMD, Multiple Instruction Multiple Data).

Типичными представителями SIMD являются векторные архитектуры. К классу MISD ряд исследователей относит конвейерные ЭВМ, однако это не нашло окончательного признания, поэтому можно считать, что реальных систем — представителей данного класса не существует. Класс

MIMD включает в себя многопроцессорные системы, где процессоры обрабатывают множественные потоки данных. Отношение конкретных машин к конкретному классу сильно зависит от точки зрения исследователя. Так, конвейерные машины могут быть отнесены и к классу SISD (конвейер — единый процессор), и к классу SIMD (векторный поток данных с конвейерным процессором), и к классу MISD (множество процессоров конвейера обрабатывают один поток данных последовательно), и к классу MIMD — как выполнение последовательности различных команд (операций ступеней конвейера) над множественным скалярным потоком данных (вектором).

Наиболее распространенными из систем класса SIMD являются матричные системы, которые лучше всего приспособлены для решения задач, характеризующихся параллелизмом независимых объектов или данных. Организация систем подобного типа, на первый взгляд, достаточно проста. Они имеют общее управляющее устройство, генерирующее поток команд, и большое число процессорных элементов, работающих параллельно и обрабатывающих каждый свой поток данных. Таким образом, производительность системы оказывается равной сумме производительностей всех процессорных элементов. Однако на практике, чтобы обеспечить достаточную эффективность системы при решении широкого круга задач, необходимо организовать связи между процессорными элементами с тем, чтобы наиболее полно загрузить их работой. Именно характер связей между процессорными элементами и определяет разные свойства системы.

Матричные процессоры наилучшим образом ориентированы на реализацию алгоритмов обработки упорядоченных (имеющих регулярную структуру) массивов входных данных. К настоящему времени в их программировании достигнута высокая степень гибкости. Зачастую матричные процессоры используются в качестве вспомогательных процессоров, подключенных к главной универсальной ЭВМ.

Следует помнить, что применение одной операционной системы не накладывает жестких рамок по требованию к методам программирования, многие языки программирования являются кроссплатформенными, также различное ППО может быть написано на разных языках и даже платформах и технологиях, но должно общаться с нужными модулями, используя метод «запрос-ответ». Говоря о различных технологиях, в первую очередь подразумевают нейронные сети.

В отличие от цифровых систем, представляющих собой комбинации процессорных и запоминающих блоков, нейропроцессоры содержат память, распределенную в связях между очень про-

стыми процессорами, которые часто могут быть описаны как формальные нейроны или блоки из однотипных формальных нейронов. Тем самым основная нагрузка на выполнение конкретных функций процессорами ложится на архитектуру системы, детали которой в свою очередь определяются межнейронными связями. Подход, основанный на представлении как памяти данных, так и алгоритмов системой связей (и их весами), называется коннекционизмом.

Три основных преимущества нейрокомпьютеров:

1) все алгоритмы нейроинформатики высокопараллельны, а это уже залог высокого быстродействия;

2) нейросистемы можно легко сделать очень устойчивыми к помехам и разрушениям;

3) устойчивые и надежные нейросистемы могут создаваться и из ненадежных элементов, имеющих значительный разброс параметров.

В настоящее время использование нейросетей позволяет в некоторых случаях добиться лучшей производительности, чем при использовании традиционных систем вычислений.

Итоговым критерием в выборе методов и средств построения ППО для обеспечения работы и эксплуатации большого РТ является количество фирм, занятых в проекте, каждая из которых применяет свои, зачастую разные, методы и технологии.

По этой же причине само ППО разделено на несколько частей, из которых опишем основные.

Управляющие программы, задачами которых являются:

— задания программных движений с интерполяторами;

— вычисления ошибок и коррекций;

— формирование законов управления.

От качества данного ППО напрямую зависят скорость и точность работы всего телескопа, для повышения производительности можно использовать нейросети, однако, в данном случае быстрое действие не должно идти в ущерб качеству, — ошибка или неточность, допущенная в написании управляющей программы, может сказаться на верности результатов измерений.

Также необходимым ППО является *прогнозирующая модель*, которая отслеживает состояние динамического объекта, осуществляя прогноз на время принятия решения, что позволяет компенсировать временное запаздывание, которое могло бы привести к снижению точности наведения. В данном модуле лучше всего использовать нейросеть, так как описать все возможные изменения в динамике КИР традиционными алгоритмами сложно.

Еще одно немаловажное ППО — *графический интерфейс*, предоставляющий всю полезную информацию в понятном для пользователя виде. На

данный момент практически любой язык программирования в системе Unix имеет широкие графические возможности, этот модуль является наиболее простым с точки зрения программирования и отладки, и использование нейросетей здесь не обязательно. Однако следует правильно подобрать палитру цветов и способ графического вывода изображений, поскольку требуется адекватная передача естественных цветов, превращающих численные характеристики интенсивности (яркости) в осмысленные изображения звездного неба.

Экспертная система — ППО, которое обеспечивает возможность инициализации тех программно реализованных алгоритмов управления или распознавания, выбор которых в той или иной ситуации представляется наиболее оправданным. Важнейшим среди множества принципиальных вопросов построения экспертной системы является определение объема выполняемых функций, синтез архитектуры построения, формирование базы алгоритмов и соответствующей базы знаний, конструирование машины логического вывода, обеспечивающей режим реального времени. Как и в случае с прогнозирующей моделью, лучшим выбором для основы данного ППО является нейросеть.

И в заключение — ППО *статистической обработки*, которое обеспечивает сбор, хранение и выдачу нужных данных. Модуль представляет собой практически базу данных, использование нейросети не требуется. В целях сжатия поступающих данных и разгрузки сети и устройств хранения информации возможно использование алгоритмов сжатия. Например, для уменьшения нагрузки на сеть при скоростях передачи менее 64 Кбит/с можно использовать алгоритм Ван Якобсона (RFC-1144). При этом достижимо повышение пропускной способности на 50 % для скорости передачи 4800 бит/с. Сжатие заголовков зависит от типа протокола. При передаче больших пакетов на сверхвысоких скоростях по региональным сетям используются специальные канальные алгоритмы, не зависящие от рабочих протоколов.

Следует упомянуть, что сжатие на программном уровне влечет за собой потерю производительности отдельных систем, поэтому его можно использовать только при сильной загрузке сетевого канала. В связи с этим для сжатия информа-

ции целесообразно применять аппаратные средства, которые должны располагаться как со стороны передатчика, так и со стороны приемника. Такие устройства дают хорошие коэффициенты сжатия и приемлемые задержки.

Заключение

Системы управления большими РТ целесообразно строить в виде управляющей компьютерной сети, решающей задачу распределенного сетевого (децентрализованного) управления сложным техническим комплексом типа радиотелескопа РТ-70.

Для обеспечения всех режимов работы системы управления подобного РТ миллиметрового диапазона необходимо обеспечивать параллельную работу различных управляющих вычислительных подсистем в режиме реального времени, а также осуществлять моделирование динамики зеркальной системы и распределения электромагнитного поля в плоскости приемника излучения с использованием нейросетевой технологии.

Программное обеспечение для обработки измерительной и диагностической информации должно содержать интеллектуальные компоненты в виде экспертных подсистем.

Литература

1. Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю. Метод повышения качества наведения большого радиотелескопа миллиметрового диапазона с адаптивной зеркальной системой // Информационно-управляющие системы. 2007. № 5. С. 14–19.
2. Система автоматического наведения радиотелескопа / Артеменко Ю. Н., Городецкий А. Е., Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю. и др., патент на изобретение (заявка № 2006125897) ФИПС от 03 июля 2007.
3. Дубаренко В. В., Коновалов А. С., Кучмин А. Ю. Математические модели механических систем как объектов управления: учеб. пособие / ГУАП. СПб., 2007. — 188 с.
4. Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю. Адаптивная платформа облучателя // Завалишинские чтения'07 / ГУАП. СПб., 2007. — С. 87–92.

УДК 621.391

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОМЕРНЫХ АДАПТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ-ОРТОГОНАЛИЗАТОРОВ

А. Р. Бестугин,

канд. техн. наук, доцент

В. А. Шаталова,

канд. техн. наук, старший преподаватель

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Предложены адаптивные алгоритмы подстройки весовых коэффициентов многомерных фильтров-ортогонализаторов, выполняющих ортогонализацию компонент входного векторного случайного процесса методами прямых вычислений. Получено аналитическое выражение совместной плотности распределения вероятностей выборочных оценок дисперсий выходных напряжений многомерных адаптивных фильтров-ортогонализаторов.

Ключевые слова – ортогонализация, адаптивный алгоритм, статистические характеристики.

Введение

Многомерные адаптивные фильтры-ортогонализаторы осуществляют преобразование входных векторных случайных процессов (СП) ξ_n , $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ с коррелированными компонентами в СП η_n с некоррелированными компонентами и являются основной составной частью многомерных адаптивных выбеливающих фильтров [1]. Они также широко применяются при решении задач обнаружения, оценивания параметров, разрешения и распознавания образов объектов в качестве самостоятельных устройств [2].

Несмотря на множество работ, посвященных применению и реализации указанных фильтров, не рассмотренными [3] остались вопросы оценивания скорости сходимости адаптивных алгоритмов и вида плотностей распределения вероятностей (ПРВ) выборочных оценок весовых коэффициентов и дисперсий выходных напряжений фильтров-ортогонализаторов, формируемых на каждом шаге адаптации. Получено выражение [4], позволяющее определить скорость сходимости адаптивного алгоритма фильтра-ортогонализатора, подстройка весовых коэффициентов которого осуществляется по методу прямых вычислений. Решен также важный вопрос — нахождение ПРВ выборочных оценок весовых коэффициентов адаптивных фильтров-ортогонализаторов [5].

Цель данной работы состоит в определении ПРВ выборочных дисперсий выходных напряжений адаптивных фильтров-ортогонализаторов.

Адаптивные многоканальные фильтры-ортогонализаторы

Фильтр-ортогонализатор осуществляет пространственную обработку в соответствии с выражением [1, 2, 4]

$$\eta_n = \xi_n - \mathbf{H}\eta_n, \quad (1)$$

где ξ_n и η_n — L -мерные комплексные векторы выборок входных и выходных напряжений ортогонализатора, взятых в произвольный момент времени n ; \mathbf{H} — $L \times L$ нижняя треугольная матрица весовых коэффициентов h_{il} с нулевой главной диагональю, $h_{il} = r_{il}/\theta_{ll}$, здесь $r_{il} = M[\xi_i \eta_l^*]$; $\theta_{ll} = M[\eta_l \eta_l^*] = M[|\eta_l|^2]$; $M[\cdot]$ означает операцию вычисления математического ожидания от выражения, стоящего в квадратных скобках; ξ_i и η_l — соответствующие элементы векторов ξ_n и η_n ; $*$ означает комплексно сопряженную случайную величину, эрмитово сопряженную матрицу или вектор. Предполагается, что $M[\xi_n] = \mathbf{0}$, $\mathbf{0}$ — нулевой вектор.

В случае гауссовой совместной ПРВ выборок вектора ξ_n , когда неизвестна ковариационная матрица $\mathbf{K}_\xi = M[\xi_n \xi_n^*]$, в процедуре (1) вместо истинных значений весовых коэффициентов h_{il} необходимо использовать их оценки максимального

правдоподобия, получаемые по p независимым выборкам СП ξ_n и η_n :

$$\hat{h}_{il} = \hat{r}_{il} / \hat{\theta}_{il}; \quad (2)$$

$$\hat{r}_{il} = p^{-1} \sum_{n=1}^p \xi_{i,n} \eta_{l,n}^*, \quad \hat{\theta}_{il} = p^{-1} \sum_{n=1}^p \eta_{l,n} \eta_{l,n}^*. \quad (3)$$

При практическом использовании алгоритмов целесообразнее применять итерационные алгоритмы вычисления оценок неизвестных параметров r_{il} , σ_{il}^2 с помощью алгоритмов стохастической аппроксимации:

$$\hat{r}_{il}(n+1) = \hat{r}_{il}(n) - \mu(n) [\hat{r}_{il}(n) - \xi_i(n) \eta_l^*(n)]; \quad (4)$$

$$\hat{\theta}_{il}(n+1) = \hat{\theta}_{il}(n) - \mu(n) [\hat{\theta}_{il}(n) - \eta_l(n) \eta_l^*(n)]. \quad (5)$$

Алгоритмы сходятся в среднеквадратическом, если последовательность чисел $\mu(n)$ выбирается из условия

$$\mu(n) > 0, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \mu(n) = \infty, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \mu^2(n) < \infty. \quad (6)$$

Применение оценок максимального правдоподобия в виде (2), (3) и процедур стохастической аппроксимации (4), (5) обеспечивает сходимость точно такую же, как и при использовании метода прямого обращения выборочной ковариационной матрицы $\hat{\mathbf{K}}_{\xi}$ [2, 4].

В работах [2, 4] показано, что процедура (1) может выполняться с выбором ведущего элемента. Ее важным преимуществом является естественное ограничение величины весовых коэффициентов $|h_{ij}| < 1$; $\forall i, j \in \overline{1, L}$; $\forall i > j$; упорядоченность по дисперсиям выходных напряжений ортогонализатора $\hat{\theta}_{11} > \hat{\theta}_{22} > \dots > \hat{\theta}_{LL}$, что не всегда имеет место в исходной процедуре.

Совместная плотность распределения вероятностей выборочных дисперсий выходных напряжений адаптивных фильтров-ортогонализаторов

Совместная ПРВ элементов выборочной матрицы $\hat{\mathbf{K}}_{\xi}$ гауссова СП ξ_i имеет вид

$$p(\hat{\mathbf{K}}_{\xi}) = \frac{|\hat{\mathbf{K}}_{\xi}|^{p-L} \exp\{-\text{tr}(\mathbf{K}_{\xi}^{-1} \hat{\mathbf{K}}_{\xi})\}}{\pi^{2^{L(L-1)}} \Gamma(p) \dots \Gamma(p-L+1) |\mathbf{K}_{\xi}|^p} \quad (7)$$

и является так называемой комплексной ПРВ Уишарта [5].

Определим совместную ПРВ выборочных оценок дисперсий $\hat{\theta}_{ii}$, $i \in \overline{1, L}$ напряжений, формируемых на выходах фильтров-ортогонализаторов.

Найдем совместную ПРВ $p(\hat{\mathbf{H}}_0, \hat{\Theta}_{\eta})$. Для этого прежде всего вычислим якобиан преобразова-

ния j . Можно показать [5], что в случае входного комплексного гауссова СП j равен квадрату определителя Вандермонда: $j = 2^L \prod_{i=1}^{L-1} \prod_{l=i+1}^L (\hat{\theta}_{ii} - \hat{\theta}_{ll})^2$.

Совместную ПРВ $\hat{\mathbf{H}}_0$ и $\hat{\Theta}_{\eta}$ найдем, заменяя в (7) $\hat{\mathbf{K}}_{\xi} = \hat{\mathbf{H}}_0 \hat{\Theta}_{\eta} \hat{\mathbf{H}}_0^*$, учитывая, что $|\hat{\mathbf{K}}_{\xi}| = |\hat{\mathbf{H}}_0| |\hat{\Theta}_{\eta}| \times |\hat{\mathbf{H}}_0^*| = |\hat{\Theta}_{\eta}|$, $|\hat{\mathbf{H}}_0| = |\hat{\mathbf{H}}_0^*| = 1$ и умножая полученный результат на якобиан j . В результате получим

Совместную ПРВ $\hat{\mathbf{H}}_0$ и $\hat{\Theta}_{\eta}$ найдем, заменяя в (7) $\hat{\mathbf{K}}_{\xi} = \hat{\mathbf{H}}_0 \hat{\Theta}_{\eta} \hat{\mathbf{H}}_0^*$, учитывая, что $|\hat{\mathbf{K}}_{\xi}| = |\hat{\mathbf{H}}_0| |\hat{\Theta}_{\eta}| \times |\hat{\mathbf{H}}_0^*| = |\hat{\Theta}_{\eta}|$, $|\hat{\mathbf{H}}_0| = |\hat{\mathbf{H}}_0^*| = 1$ и умножая полученный результат на якобиан j . В результате получим

Совместную ПРВ $\hat{\mathbf{H}}_0$ и $\hat{\Theta}_{\eta}$ найдем, заменяя в (7) $\hat{\mathbf{K}}_{\xi} = \hat{\mathbf{H}}_0 \hat{\Theta}_{\eta} \hat{\mathbf{H}}_0^*$, учитывая, что $|\hat{\mathbf{K}}_{\xi}| = |\hat{\mathbf{H}}_0| |\hat{\Theta}_{\eta}| \times |\hat{\mathbf{H}}_0^*| = |\hat{\Theta}_{\eta}|$, $|\hat{\mathbf{H}}_0| = |\hat{\mathbf{H}}_0^*| = 1$ и умножая полученный результат на якобиан j . В результате получим

$$p(\hat{\mathbf{H}}_0, \hat{\Theta}_{\eta}) = \frac{c_1 |\hat{\Theta}_{\eta}|^{p-L} \exp\{-\text{tr}(\mathbf{K}_{\xi}^{-1} \hat{\mathbf{H}}_0 \hat{\Theta}_{\eta} \hat{\mathbf{H}}_0^*)\}}{\pi^{2^{L(L-1)}} \prod_{i=0}^{L-1} \Gamma(p-i) |\Theta_{\eta}|^p} \times 2^L \prod_{i=1}^{L-1} \prod_{l=i+1}^L (\hat{\theta}_{ii} - \hat{\theta}_{ll})^2, \quad (8)$$

где c_1 — коэффициент, выбираемый из условия нормировки:

$$c_1 \int_{\hat{h}_{il} \in \hat{H}_0} \dots \int_{\hat{\theta} \in \hat{\Theta}_{\eta}} p(\hat{\mathbf{H}}_0, \hat{\Theta}_{\eta}) \prod_{i=1}^{L-1} \prod_{l=i+1}^L d\hat{h}_{il, 0} \prod_{i=1}^L d\hat{\theta}_{ii} = 1. \quad (9)$$

Для того чтобы определить частное распределение $p(\hat{\Theta}_{\eta})$, необходимо проинтегрировать (8) по элементам матрицы $\hat{\mathbf{H}}_0$ в пределах $-1 \leq h_{il0} \leq 1$, $\forall i > l$, $\forall i \in \overline{2, L}$:

$$p(\hat{\Theta}_{\eta}) = c_1 c_2 \int_{-1}^1 \dots \int_{-1}^1 \exp\{-\text{tr}[\mathbf{K}_{\xi}^{-1} \hat{\mathbf{H}}_0 \hat{\Theta}_{\eta} \hat{\mathbf{H}}_0^*]\} \times d\hat{h}_{21,0} \dots d\hat{h}_{LL-1,0}, \quad (10)$$

где

$$c_2 = 2^L |\hat{\Theta}_{\eta}|^{p-L} \prod_{i=1}^{L-1} \prod_{l=i+1}^L (\hat{\theta}_{ii} - \hat{\theta}_{ll})^2 \times \left\{ \pi^{2^{L(L-1)}} \prod_{i=0}^{L-1} \Gamma(p-i) |\Theta_{\eta}|^p \right\}^{-1}.$$

Возможны несколько вариантов вычисления данного интеграла. Первый основан на использовании экстремальных свойств собственных чисел $\hat{\Lambda}_i$ и собственных векторов $\hat{\mathbf{U}}_i$ матрицы $\hat{\mathbf{K}}_{\xi}$. Здесь будет рассмотрен второй вариант, базирующийся на представлении матрицы $\hat{\mathbf{K}}_{\xi}$ в виде сум-

мы матриц ранга 1: $\hat{\mathbf{K}}_{\xi} = \hat{\mathbf{H}}_0 \hat{\Theta}_{\eta} \hat{\mathbf{H}}_0 = \sum_{i=1}^L \hat{\theta}_{ii} \hat{\mathbf{H}}_i \hat{\mathbf{H}}_i^*$, где $\hat{\mathbf{H}}_i$ — матрица, у которой i -й столбец совпадает с i -м столбцом $\hat{\mathbf{h}}_{i0}$ матрицы $\hat{\mathbf{H}}_0$, а остальные элементы равны нулю. Необходимо отметить, что

$\hat{\mathbf{H}}_0$ является матрицей с ортогональными столбцами. Можно показать простым перемножением,

$$\text{что } \hat{\mathbf{K}}_\xi = \hat{\mathbf{H}}_0 \hat{\Theta}_\eta \hat{\mathbf{H}}_0 = \sum_{i=1}^L \hat{\theta}_{ii} \hat{\mathbf{H}}_i \hat{\mathbf{H}}_i^* = \sum_{i=1}^L \hat{\theta}_{ii} \hat{\mathbf{h}}_{i0} \hat{\mathbf{h}}_{i0}^*.$$

Это позволяет записать интеграл в (10) в виде

$$p(\hat{\Theta}_\eta) = c_1 c_2 \prod_{i=1}^L \int_{-1}^1 \dots \int_{-1}^1 \exp\left\{-\hat{\theta}_{ii} \hat{\mathbf{h}}_{i0}^* \mathbf{K}_\xi^{-1} \hat{\mathbf{h}}_{i0}\right\} \times \\ \times d\hat{h}_{21,0} \dots d\hat{h}_{LL-1,0}. \quad (11)$$

Представим $\hat{\mathbf{h}}_{i0}^T = [\mathbf{0}^T, 1, \hat{h}_{i+1,i}, \dots, \hat{h}_{L,i}]$ в виде суммы двух векторов $\hat{\mathbf{h}}_{i0}^T = \mathbf{1}_i^T + \hat{\mathbf{h}}_i^T$, где $\mathbf{1}_i^T = [\mathbf{0}^T, 1, 0, \dots, 0]$, $\hat{\mathbf{h}}_i^T = [\mathbf{0}^T, 0, \hat{h}_{i+1,i}, \dots, \hat{h}_{L,i}]$. Тогда получим, что

$$\hat{\mathbf{h}}_{i0}^* \mathbf{K}_\xi^{-1} \hat{\mathbf{h}}_{i0} = (\mathbf{1}_i + \hat{\mathbf{h}}_i)^* \mathbf{K}_\xi^{-1} (\mathbf{1}_i + \hat{\mathbf{h}}_i) = \\ = (\mathbf{1}_i^T \mathbf{K}_\xi^{-1} \mathbf{1}_i) + (\hat{\mathbf{h}}_i^* \mathbf{K}_\xi^{-1} \mathbf{1}_i) + \\ + (\mathbf{1}_i^T \mathbf{K}_\xi^{-1} \hat{\mathbf{h}}_i) + (\hat{\mathbf{h}}_i^* \mathbf{K}_\xi^{-1} \hat{\mathbf{h}}_i). \quad (12)$$

Заметим, что $(\mathbf{1}_i^T \mathbf{K}_\xi^{-1} \mathbf{1}_i) = k_{\xi ii}$ — i -й диагональный элемент матрицы \mathbf{K}_ξ^{-1} . С другой стороны, $(\hat{\mathbf{h}}_i^* \mathbf{K}_\xi^{-1} \mathbf{1}_i)$ означает, что в результате умножения

$\mathbf{K}_\xi^{-1} \mathbf{1}_i$ выбирается i -й вектор-столбец $\mathbf{k}_{\xi i}^i$ матрицы \mathbf{K}_ξ^{-1} , который затем умножается на вектор $\hat{\mathbf{h}}_i^*$. Полученное скалярное произведение

$$\hat{\mathbf{h}}_i^* \mathbf{K}_{\xi i} = \sum_{j=i+1}^L \hat{h}_{ij} k_{\xi ij}$$

можно преобразовать к виду $\hat{\mathbf{h}}_i^* \mathbf{D}_\xi^{-1} \hat{\mathbf{h}}_i$, если каждый элемент суммы одновременно умножить и разделить на \hat{h}_{ij} и обозначить $d_{jj}^{-1} = k_{\xi ij} / \hat{h}_{ij}$.

С учетом введенных обозначений и сделанных пояснений представим

$$\hat{\mathbf{h}}_{i0}^* \mathbf{K}_\xi^{-1} \hat{\mathbf{h}}_{i0} = k_{\xi ii} + 2(\hat{\mathbf{h}}_{i0}^* \mathbf{K}_\xi^{-1} \mathbf{1}_i) + \hat{\mathbf{h}}_i^* \mathbf{K}_\xi^{-1} \hat{\mathbf{h}}_i = \\ = k_{\xi ii} + 2\hat{\mathbf{h}}_i^* \mathbf{D}_\xi^{-1} \hat{\mathbf{h}}_i + \hat{\mathbf{h}}_i^* \mathbf{K}_\xi^{-1} \hat{\mathbf{h}}_i = \\ = k_{\xi ii} + \hat{\mathbf{h}}_i^* (2\mathbf{D}_\xi^{-1} + \mathbf{K}_\xi^{-1}) \hat{\mathbf{h}}_i = k_{\xi ii} + \hat{\mathbf{h}}_i^* \mathbf{K}_{\xi D}^{-1} \hat{\mathbf{h}}_i. \quad (13)$$

Тогда (11) приобретает следующий вид:

$$p(\hat{\Theta}_\eta) = c_1 c_2 \prod_{i=1}^L \int_{-1}^1 \dots \int_{-1}^1 \exp\left\{-\hat{\theta}_{ii} k_{\xi ii} - \hat{\theta}_{ii} \hat{\mathbf{h}}_i^* \mathbf{K}_{\xi D}^{-1} \hat{\mathbf{h}}_i\right\} \times \\ \times d\hat{h}_{21} \dots d\hat{h}_{LL-1} = c_1 c_2 \prod_{i=1}^L \exp\left\{-\hat{\theta}_{ii} k_{\xi ii}\right\} \times \\ \times \int_{-1}^1 \dots \int_{-1}^1 \exp\left\{-\hat{\theta}_{ii} \hat{\mathbf{h}}_i^* \mathbf{K}_{\xi D}^{-1} \hat{\mathbf{h}}_i\right\} d\hat{h}_{21} \dots d\hat{h}_{ll-1}. \quad (14)$$

В соответствии с процедурой квадратного корня запишем $\mathbf{K}_{\xi D}^{-1} = (\mathbf{K}_1^*)^{-1} \mathbf{K}_1^{-1}$, где \mathbf{K}_1^{-1} — нижняя треугольная матрица, и сделаем замену переменных под знаком интеграла

$$2^{-\frac{1}{2}} \hat{\mathbf{V}}_{i0} = \hat{\theta}_{ii}^{\frac{1}{2}} \mathbf{K}_1^{-1} \hat{\mathbf{h}}_i \quad \text{или} \quad \hat{\mathbf{h}}_i = 2^{-\frac{1}{2}} \hat{\theta}_{ii}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{K}_1 \hat{\mathbf{V}}_{i0}. \quad (15)$$

Тогда

$$2^{-\frac{1}{2}} d\hat{\mathbf{V}}_{i0} = \hat{\theta}_{ii}^{\frac{1}{2}} \mathbf{K}_1^{-1} d\hat{\mathbf{h}}_i \quad \text{и} \quad d\hat{\mathbf{h}}_i = 2^{-\frac{1}{2}} \hat{\theta}_{ii}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{K}_1 d\hat{\mathbf{V}}_{i0}. \quad (16)$$

Это означает, что

$$d\hat{h}_{il} = 2^{-\frac{1}{2}} \hat{\theta}_{ii}^{-\frac{1}{2}} \sum_{r=i}^l k_{1lr} d\hat{v}_{ir0} = \\ = (2\hat{\theta}_{ii})^{-\frac{1}{2}} \left[\sum_{r=i}^l k_{1lr} \frac{d\hat{v}_{ir0}}{d\hat{v}_{i0}} \right] d\hat{v}_{i0} = \\ = 2^{-\frac{1}{2}} \hat{\theta}_{ii}^{-\frac{1}{2}} \nu_{il} d\hat{v}_{i0}. \quad (17)$$

Пределы интегрирования для каждого элемента \hat{v}_{i0} , $l \in i+1, L$, $i \in 1, L-1$ определяются из (15)

$$-\tau_{il} = -2^{\frac{1}{2}} \hat{\theta}_{ii}^{\frac{1}{2}} \sum_{r=i}^l k_{1lr} \leq \hat{v}_{i0} \leq \\ \leq 2^{\frac{1}{2}} \hat{\theta}_{ii}^{\frac{1}{2}} \sum_{r=i}^l k_{1lr} = \tau_{il}, \quad (18)$$

где \hat{h}_{lr}^* — элемент матрицы $\hat{\mathbf{H}}_0^*$, находящийся на пересечении строки с номером « l » и столбца с номером « r ». Поскольку $\hat{\mathbf{H}}_0^*$ — верхняя треугольная матрица, $\forall \hat{h}_{ir} = 0, \forall r \in 1, L-1$.

Окончательный вариант (14) с учетом (15)–(18) имеет вид

$$p(\hat{\Theta}_\eta) = c_3 2^{-\frac{L(L-1)}{4}} \prod_{i=1}^L \hat{\theta}_{ii}^{-\frac{L-i}{2}} \exp\left\{-\hat{\theta}_{ii} k_{\xi ii}\right\} \prod_{l=i+1}^L \nu_{il} \times \\ \times \int_{-\tau_{il}}^{\tau_{il}} \exp\left\{-|\hat{v}_{i0}|^2 2^{-1}\right\} d\hat{v}_{i0} = c_3 2^{-\frac{L(L-1)}{4}} \prod_{i=1}^L \hat{\theta}_{ii}^{-\frac{L-i}{2}} \times \\ \times \exp\left\{-\hat{\theta}_{ii} k_{\xi ii}\right\} \prod_{l=i+1}^L \nu_{il} (\pi/\pi)^{\frac{L(L-1)}{4}} \times \\ \times \int_{-\tau_{il}}^{\tau_{il}} \exp\left\{-|\hat{v}_{i0}|^2 2^{-1}\right\} d\hat{v}_{i0} = \\ = c_3 \pi^{-\frac{L(L-1)}{4}} \prod_{i=1}^L \hat{\theta}_{ii}^{-\frac{L-i}{2}} z_i(\tau_i) \exp\left\{-\hat{\theta}_{ii} k_{\xi ii}\right\}, \quad (19)$$

$$\text{где } c_3 = c_1 c_2; \quad z_i(\tau_i) = \prod_{l=i+1}^L \nu_{il} \operatorname{erf}(\tau_{il}/\sqrt{2}),$$

$$\operatorname{erf}(\tau_{ii}/\sqrt{2}) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \int_{-\tau_{ii}}^{\tau_{ii}} \exp\left\{-|\hat{v}_{i0}|^2 2^{-1}\right\} d\hat{v}_{i0}$$

— интеграл вероятностей.

Таким образом, плотность распределения (16) определяется формулой

$$p(\hat{\Theta}_\eta) = \frac{2^L \prod_{\zeta=1}^L \hat{\theta}_{\zeta\zeta}^{p-\frac{3L+\zeta}{2}} z_\zeta(\tau_\zeta) \prod_{i=1}^{L-1} \prod_{l=i+1}^L (\hat{\theta}_{ii} - \hat{\theta}_{ll})^2}{\pi^{\frac{L(L-1)}{4}} \Gamma(p) \dots \Gamma(p-L+1) |\Theta_\eta|^p} \times \exp\left\{-\hat{\theta}_{\zeta\zeta} k_{\zeta\zeta}\right\}. \quad (20)$$

Область интегрирования конечна, так как $\forall \hat{\theta}_{ii} \in \hat{K}_\xi$ различны с вероятностью 1 и упорядочены по величине $\hat{\theta}_{11} > \hat{\theta}_{22} > \dots > \hat{\theta}_{LL}$, так что $\alpha_i < \hat{\theta}_{ii} \leq \beta_{ii}$, $\forall i \in \overline{1, L}$. Как следствие, $\forall (\alpha_i, \beta_i]$ не перекрываются, т. е. $\forall (\alpha_i, \beta_i] \cap (\alpha_l, \beta_l] = \emptyset$. С дру-

гой стороны, $\operatorname{tr} \hat{K}_\xi = \operatorname{tr} \hat{\Theta} \geq \hat{\theta}_{11}$. Вычисление интеграла в (9) при больших p и L представляет весьма сложную задачу.

Обращаясь к (20), замечаем, что $\forall \hat{\theta}_{ii}$ являются зависимыми случайными величинами, так как $p(\hat{\Theta}_\eta)$ не может быть представлена в виде произведения ПРВ $p(\hat{\theta}_{ii})$, $i \in \overline{1, L}$. Зависимость $p(\hat{\Theta}_\eta)$ от матрицы \hat{K}_ξ заключается в коэффициентах $v_{\zeta n}$.

Заключение

В результате анализа адаптивных алгоритмов (2)–(5), реализующих процедуру ортогонализации Грама—Шмидта, впервые получены выражение (8) для совместной плотности распределения выборочных значений весовых коэффициен-

тов и дисперсий выходных напряжений, формируемых на выходах фильтров-ортогонализаторов, а также формула (20) для совместной плотности распределения выборочных дисперсий выходных напряжений, формируемых на выходах фильтров-ортогонализаторов. Последняя отличается от известной многомерной плотности распределения выборочной ковариационной матрицы Уишарта (7). На основании (20) можно утверждать, что оценки дисперсий выходных напряжений адаптивных фильтров-ортогонализаторов являются зависимыми случайными величинами.

Скорость сходимости предложенных алгоритмов такая же, как у всех известных адаптивных алгоритмов, реализуемых методом прямых вычислений [2, 3].

Литература

1. Лексаченко В. А., Шаталов А. А. Синтез многомерного выбеливающего фильтра по методу Грама—Шмидта // Радиотехника и электроника. 1976. Т. 21. № 1. С. 112–119.
2. Давыдов В. С., Лукошкин А. П., Шаталов А. А., Ястребков А. Б. Радиолокация сложных целей. Решение и распознавание. — СПб.: Янис, 1993. — 280 с.
3. Naykin S. Adaptive Filter Theory. 4th edition. — Prentice Hall, 2002. — 936 p.
4. Шаталов А. А., Ястребков А. Б., Селезнев Б. Н. Быстродействующие алгоритмы адаптации многомерных адаптивных выбеливающих фильтров // Радиотехника и электроника. 1984. Т. 29. № 1. С. 36–42.
5. Шаталов А. А., Авдеев А. Г. Многомерные адаптивные предпроцессоры и их статистические характеристики // Радиотехника. 2004. № 11. С. 12–19.

УДК 62-519

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ АДАПТИВНЫМИ СЕТЯМИ ПОСТАВОК НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ КОЛЛЕКТИВНОГО ИНТЕЛЛЕКТА И АГЕНТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ Часть 1: Модель сети поставок

Л. Б. Шереметов,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук

Приводится один из подходов к децентрализованному управлению сетями поставок, основанный на концепциях коллективного интеллекта и многоагентных системах. Построена модель сети поставок. Для оптимального управления потоками в условиях неопределенной среды на локальном уровне использованы алгоритмы стимулируемого обучения, а для оптимизации глобального поведения сети предложен алгоритм двойной Q-маршрутизации.

Ключевые слова — сети поставок, многоагентная система, теория коллективного интеллекта, стимулируемое обучение.

Введение

В данной статье рассматривается эмерджентный тип производственных систем, известных как адаптивные сети поставок (АСП), т. е. сети с изменяющейся топологией, которая может эволюционировать во времени (*adaptive supply networks*)¹. АСП управляются уже не централизованно компаниями-лидерами, а через виртуальные пространства принятия решений (ПР), где оптимизация решений все больше и больше доминирует как критический фактор, обеспечивающий конкурентоспособность предприятий [1]. При этом ПР по конфигурированию и управлению АСП осуществляется в динамической окружающей среде, где децентрализованная система ПР становится необходимостью [2, 3]. Это диктует необходимость разрабатывать новые подходы к решению задач оптимизации, лежащих в их основе. С одной стороны, традиционные проблемы оптимизации требуют новых алгоритмов, моделирующих возможности членов сети на макро- и микроуровнях, и обмена информации между уровнями. С другой стороны, наличие информации о состоянии сети в реальном времени создает

¹Близкими по смыслу терминами являются открытые сети поставок и сети поставок «по требованию» (*open and on-demand supply networks*).

необходимость и дает возможность повторной оптимизации, которая способна быстро скорректировать план в ответ на изменения в исходных данных.

Децентрализация управления в АСП имеет особую характеристику, которая заключается в том, что все локальные системы управления принимают решения в условиях неопределенности, поскольку любая доступная информация о других партнерах АСП может быть неполной, нечеткой и недостоверной. При этом каждый партнер должен работать независимо от другого, анализируя свое собственное состояние, состояние внешнего мира и принимая решения. Иными словами, он должен быть автономным и активным, добиваясь локальных целей таким образом, чтобы глобальная цель АСП была достигнута более эффективно. Такие автономные системы обычно рассматриваются как многоагентные системы (МАС) [4]. Использование технологии агентов для оптимизации процессов обусловлено двумя решающими факторами: возрастающей изменчивостью среды и децентрализованным ПР [5]. Данная работа преследует цель исследовать то, как интеграция агентов со способностями к коллективному обучению способствует распределенному и децентрализованному ПР. Проблема оптимизации поведения АСП рассматривается

в контексте теории коллективного интеллекта (КОИН) [6], которая является расширением модели динамического программирования и алгоритмов стимулируемого обучения (например, Q-обучения и Q-маршрутизации) [7, 8].

Предлагаемая статья состоит из двух частей. В первой части разработана модель сети поставок, основанная на интеграции алгоритмов коллективного интеллекта в систему агентного моделирования. На локальном уровне использованы алгоритмы стимулируемого обучения, а для оптимизации глобального поведения АСП предложен алгоритм двойной Q-маршрутизации. Обмен информацией и коллективное обучение, встроенные в алгоритм оптимизации, являются отличительными чертами данного подхода. Во второй части работы будут рассмотрены вопросы реализации предложенной модели в многоагентной среде моделирования и примеры ее использования для управления поведением и конфигурацией АСП, основанного на анализе производственной мощности.

Состояние исследований в области управления АСП

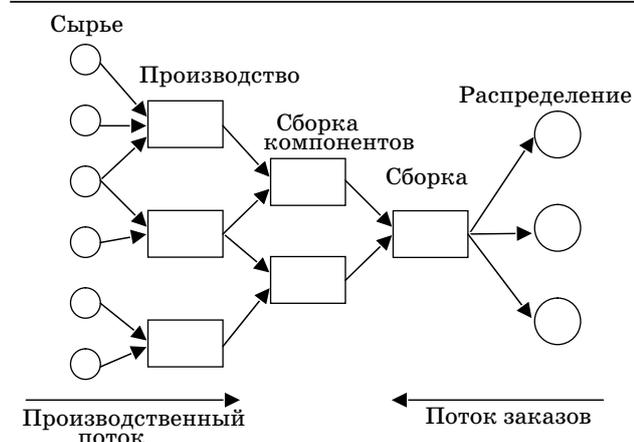
Эволюция концепции производственных цепочек к адаптивным сетям поставок оказывает существенное влияние на постановку и методы решения задач по управлению как отдельными производствами, так и сетью поставок в целом. Термин «цепь поставок» (*supply chain*) используется с 1980-х гг. для описания полного спектра операций — от заказа сырья, производства и сборки продукции до оптовых и розничных поставок продукции конечным потребителям. Цепь поставок, таким образом, хорошо изображается как сеть поставщиков, производителей и заказчиков (рис. 1).

Традиционно управленческие решения в сетях поставок принято классифицировать на три

категории [9]: стратегические, операционные и управляющие. Стратегические решения, такие как, например, выбор участника сети поставок, носят долгосрочный характер. Операционные решения относятся к производственным решениям для выполнения заказов. Наконец, управляющие касаются решений по заказам, находящимся в производстве. Современный этап развития цепей поставок характеризуется преобразованием традиционных линейных структур в сложные, гибкие и открытые сети поставок, в которых связи между их участниками уже не носят столь выраженной линейной структуры. АСП отличаются возрастанием сложности ПР, что приводит к изменению характера решаемых задач. Свойства открытости и гибкости сетей видоизменяют временной масштаб ПР, когда приходится переоптимизировать решения, например о переконфигурировании сети, каждый раз, когда принят в рассмотрение новый заказ [10]. Это обеспечивает возможность разумно объединить новый заказ со всеми другими внеплановыми заказами. Новый заказ может иметь ассоциируемый с ним предельный срок, и, следовательно, вся операция должна осуществляться с мягкими ограничениями в реальном времени. Этот тип операций в сети поставок называется операциями в реальном времени.

Существующие многочисленные алгоритмы и методы локальной оптимизации (например, системы календарного планирования, управления запасами, заказами, закупками, поставками и т. д.) обычно затрачивают много времени для нахождения наиболее подходящего решения, которое, при этом, далеко не всегда обеспечивает оптимизацию общего бизнес-процесса на глобальном уровне из-за конфликтов между локальными целями различных партнеров АСП [11, 12]. Кроме того, большинство этих подходов отражают традиционную модель сети поставок, являющуюся в значительной мере статической, опирающейся на долгосрочные отношения между партнерами.

Использование динамических схем конфигурации требует достаточно гибкого подхода, обеспечивающего получение компромиссных решений между локальными целями партнеров. Опубликован ряд исследовательских работ по использованию техник мягких вычислений, машинного обучения и агентов в задачах моделирования динамической сети поставок и их оптимизации в условиях неопределенности [13, 14]. Общее представление о многоагентном моделировании и управлении АСП можно найти в работах [15, 16]. Тем не менее, в агентных моделях не рассматривался вопрос о том, как строить модели принятия сложных решений в условиях неопре-



■ Рис. 1. Общая схема цепочки поставок

деленной среды. К тому же отсутствуют разработки механизмов обучения для систем, включающих большое число агентов. Поэтому в данной исследовательской работе основное внимание уделяется подходу к динамической децентрализованной оптимизации поведения элементов АСП, разработанному в рамках парадигмы многоагентных самоорганизующихся систем в условиях неопределенной среды.

Многоагентная модель адаптивной сети поставок

Предложенная модель децентрализованного управления основана на динамическом взаимодействии каждого партнера АСП со средой, а именно на моделировании по принципам теории КОИН, отражающем предположение об ограниченном знании среды.

Основы теории коллективного интеллекта.

Традиционный подход к оптимизации больших распределенных систем заключается в явном моделировании динамики системы в целом, что часто приводит к весьма неустойчивым решениям и техникам оптимизации с ограниченной применимостью. В качестве альтернативы, разработанной в рамках теории КОИН, предлагается использовать агентов, выполняющих алгоритмы стимулируемого обучения (СО), берущие основу в динамическом программировании (ДП) [17, 18]. Принцип ДП состоит в замене глобальной оптимизации на последовательную, т. е. оптимизацию каждого этапа решения (или промежутка времени) по очереди, но с учетом при этом как принятых ранее, так и оставшихся решений.

В контексте АСП следует искать оптимальность локальных решений в условиях ограничений, наложенных оптимальным поведением АСП в целом, подразумевая отсутствие первоначальной математической модели. Наиболее важными характеристиками, отличающими этот тип моделей обучения от других, являются: а) обучение путем проб и ошибок и б) наличие вознаграждения/наказания (получаемых с определенной задержкой), которые оказывают влияние на будущее поведение агента.

Одним из наиболее важных вкладов в развитие СО стала разработка алгоритма Q-обучения [8], который следует автономной (*off-line*) стратегии [17]. В этом случае функция приближения Q , полученная в результате обучения, аппроксимирует функцию оптимальной прибыли-действия Q^* независимо от последующей стратегии. В состоянии $x(t)$, если Q -значения точным образом представляют модель среды, лучше всего выполнить такое действие, которое имеет наибольшее/наименьшее Q -значение (согласно рас-

сматриваемому случаю) среди всех возможных действий $a_{i,k} \in A_i$. Модифицированные Q -значения вычисляются по правилу обновления, использующему награду $r(t + 1)$, рассчитанную средой в результате выполнения действия $a_{x(t)}$ в состоянии $x(t)$. Правило обновления Q -обучения определяется формулой

$$Q_{(x(t), a_{x(t)})}(t+1) = Q_{(x(t), a_{x(t)})}(t) + \alpha \times \left[r(t+1) + \gamma \min_{a_{x(t+1)}} Q_{(x(t+1), a_{x(t+1)})}(t+1) - Q_{(x(t), a_{x(t)})}(t) \right],$$

где $Q_{(x(t), a_{x(t)})}$ — приблизительная оценка среды,

способ обновления которой можно считать одной из наиболее важных задач, требующих решения при моделировании реальных систем; α — скорость обучения; $r(t + 1)$ — усиление произведенного действия; γ — скорость сокращения (*reduction rate*). Результат этой функции может представлять любую цену, связанную с выполнением определенного действия. При нашем подходе оно символизирует частичное время производства продукта, состоящее из времени перехода, времени ожидания и времени операции.

Метод Q-обучения позволяет решать задачи обучения только для одного агента. Тем не менее, когда несколько агентов работают в общей среде, этот метод не является достаточно эффективным, так как обуславливает эгоистичное поведение агентов (так называемая стратегия *ε greedy*). Рассмотрим концептуальную модель АСП, основанную на алгоритме коллективного обучения.

Концептуальная модель АСП.

В рамках предложенного подхода АСП рассматривается как МАС, работающая в режиме реального времени и обучающаяся путем наблюдения своего взаимодействия с реальной средой, где:

- среда имеет динамическую и неопределенную природу; ее первоначальная модель поведения неизвестна;
- каждый партнер АСП представляется как агент, имеющий автономное поведение и характеризующийся локальной функцией полезности, т. е. каждый из них имеет индивидуальное восприятие среды;
- управление и схемы взаимодействия между агентами являются децентрализованными;
- обмен сообщениями и продуктами между агентами имитирует информационные и материальные потоки;
- агенты приспособливают свое локальное поведение к изменяющейся среде, выполняя алгоритмы стимулируемого обучения;

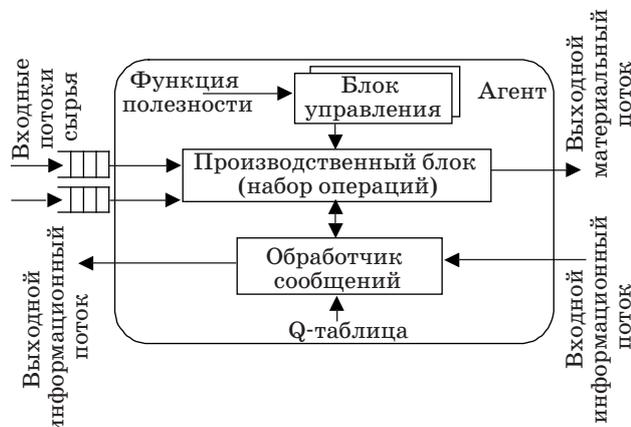
- агенты используют технику коллективного обучения для оптимизации глобального поведения, применяя алгоритм двойной Q-маршрутизации.

Оптимальное действие с точки зрения одного партнера АСП не обязательно оказывается оптимальным действием для всей АСП. Это обусловлено недостатком знания о том, что происходит у других партнеров на разных уровнях (например, на нижнем или верхнем участках сети, *downstream and upstream supply chains*). Опишем алгоритмы, используемые для согласования локальных решений, принятых каждым партнером, с глобальной целью, состоящей в оптимизации поведения всей АСП. Другими словами, ищется ответ на вопрос, каким является лучшее действие, совершенное на локальном уровне каждого партнера, позволяющее оптимизировать всю АСП.

У партнеров АСП есть общие функции, которые определяют входящие и выходящие потоки, их преобразование и управление [19]. Материалы в АСП представляются как объекты, формирующие часть среды. Поэтому каждый агент может их изменять или воздействовать на них. Детали объектов хранятся как свойства. Каждый агент имеет функцию локальной полезности и управляет Q-таблицей, которая содержит воспринимаемую информацию о среде (как об объектах среды, так и о соседних агентах). Общую схему агента (рис. 2) можно применить как к партнерам АСП, так и к компонентам каждого партнера в зависимости от необходимого уровня абстракции. Сеть агентов представляет АСП.

Согласно рис. 1 и 2, в модель АСП входят следующие элементы:

- множество l агентов складов готовой продукции (*distribution warehouse agents, DWA*) — «голова» сети: $W = \{W_1, W_2, \dots, W_l\}$;



■ Рис. 2. Общая схема агента в среде моделирования сети поставок

- множество m агентов-производителей (РА) — производители, сборщики и поставщики компонентов — промежуточные партнеры сети, обладающие как входными, так и выходными потоками: $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$;

- множество k агентов-поставщиков (SA) — «хвост» сети: $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$;

- множество q операций, выполняемых агентами: $O = \{O_1, O_2, \dots, O_q\}$;

- вектор неотрицательных значений r признаков для каждой операции O_i : $\mathbf{V}_i = \langle v_1^i, \dots, v_r^i \rangle$, где, например, v_1^i — усредненное время операции;

- множество s объектов, соответствующих типу сырья: $MP = \{MP_1, MP_2, \dots, MP_s\}$;

- множество n объектов, соответствующих типу конечного продукта: $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$;

- вектор неотрицательных значений r признаков для каждого продукта P_j : $\mathbf{P}\mathbf{V}_j = \langle pv_1^j, \dots, pv_r^j \rangle$, где, например, pv_1^j — приоритет продукта.

В предложенной модели каждый агент обладает следующими признаками.

- Множество состояний среды: $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots\}$. Знание (обычно неполное) о других агентах считается частью состояния среды. Например, в некоторых случаях агент-производитель может принимать решения без знания о том, что поставщик часто не укладывается в срок поставки.

- Способность агента к действию представляется как множество $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots\}$. Отметим, что для РА это множество является подмножеством множества операций O .

- Отношения между агентами в АСП определяются как $R = \{r_1, r_2, r_3, \dots\}$. Агенты, известные данному агенту, образуют перечень его соседей $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots\}$. В случае линейной модели в этот перечень включены только агенты от ближайшего эшелона сети. Для каждого соседнего агента учитываются следующие параметры: а) его отношение к данному агенту (заказчику, поставщику); б) природа соглашения, которое обуславливает взаимодействие (гарантии производства) и в) права доступа к информации между агентами (локальное состояние агентов, которое нужно учитывать в процессе ПР).

- Приоритеты каждого агента представляются как $Q = \{q_1, q_2, q_3, \dots\}$. Они могут использоваться при установлении последовательности обработки входящих сообщений.

- Функция локальной полезности (LUF) представляется в виде уравнения Q-обучения.

- Набор элементов управления $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots\}$. Элемент управления вызывается, когда есть решение, которое необходимо принять во время обработки сообщения. Например, для того чтобы определить следующий пункт назначения при транспортировании материалов, используется алгоритм управления маршрутизацией.

• Каждый агент имеет обработчик сообщений, который несет ответственность за отсылку и доставку различных сообщений с целью обеспечить связь между агентами.

Чтобы решить задачу оптимизации АСП, предложен алгоритм коллективного обучения, называемый алгоритмом двойной Q-маршрутизации.

Алгоритм двойной Q-маршрутизации.

Алгоритм коллективного обучения строится на основе алгоритма Q-маршрутизации, используемого для маршрутизации пакетов в коммуникационных сетях [7, 20], и алгоритмов оптимизации по принципу «муравьиной колонии» (это название было придумано изобретателем алгоритма Марко Дориго (Marco Dorigo)) [21]. Введение дополнительных обратных связей обусловило его название — алгоритм двойной Q-маршрутизации. Обучение производится на двух уровнях: вначале локально, на уровне агента, с использованием правила стимулированного обучения и затем глобально, на уровне системы, путем настройки функции полезности. Управляющие сообщения позволяют пересматривать состояния партнеров АСП, модифицируя Q-значения, которые аппроксимируются аппроксиматором функций, в качестве которого могут быть использованы таблицы поиска, нейронные сети и т. д.

В алгоритме двойной Q-маршрутизации существует 5 типов управляющих сообщений.

1. ‘Сообщение среды’ (*environment-message*), генерируемое промежуточным агентом-производителем после приема сырья, если интервал времени w уже прошел.

2. ‘Сообщение «муравей»’ (*ant-message*), генерируемое DWA в соответствии с интервалом времени w_{ants} , когда окончанный продукт поступает на склад.

3. ‘Сообщение обновления’ (*update-message*), генерируемое в фазе планирования каждые ϵ_{update} секунд в целях запроса у соседних агентов-производителей их оценок об операциях над продуктом.

4. ‘Сообщение обратного обновления’ (*update-back-message*), генерируемое после получения сообщения обновления с целью ускорить знакомство со средой.

5. ‘Сообщение наказания’ (*punishment-message*), применяемое для того, чтобы наказать РА, использующего перегруженный ресурс.

Эти сообщения применяются в рамках алгоритма двойной Q-маршрутизации, состоящего из алгоритмов планирования, «муравья» и наказания, каждый из которых выполняет особую функцию, позволяющую осуществлять децентрализованную оптимизацию. Рассмотрим каждый алгоритм более подробно (алгоритмы в псевдокоде приведены в приложении).

Алгоритм планирования исследует лучшие возможности (с точки зрения оценок Q-значений), вытекающие из непредвиденных изменений в среде. Исследование среды может вызвать существенную потерю времени! В алгоритме двойной Q-маршрутизации механизм планирования (в рамках значения этого термина в СО) был разработан на локальном уровне каждого агента. Он состоит в посылке сообщения обновления каждые ϵ_{update} секунд. Это сообщение запрашивает оценки Q-значений всех продуктов, которые на данный момент известны соседям.

В алгоритме «муравья» генерируются сообщения «муравьи», которые используются в качестве обратной связи системы: каждое сообщение переносит статистические данные, полученные на своем пути (также в терминах Q-значений), и позволяет осуществить процесс передачи информации о среде между агентами. Когда сообщение среды поступает на DWA, «муравей» посылается в ответ в том случае, если период времени w_{ants} уже прошел. Поступив на склад сырья, сообщение «муравей» умирает. «Муравей» измеряет Q-значение каждого РА, через которого прошло сырье до прибытия на DWA.

Наконец, алгоритм наказания пытается идентифицировать и разрешить конфликты (между лучшими оценками) среди соседних агентов. В некоторых случаях различные агенты из одного эшелона могут иметь одинаковую наилучшую оценку соседей (предпочитая общего партнера или одинаковый маршрут). Если они действуют «эгоистичным» образом, партнер может оказаться перегружен и в очереди к нему происходит скученность. С целью предотвратить скученность агент должен принести в жертву свою личную полезность и использовать другой маршрут. Чтобы рассмотреть эту проблему, разработан алгоритм наказания, заставляющий агента, который получает сообщение наказания, рассчитать вторую наилучшую оценку.

Алгоритм двойной Q-маршрутизации интегрирует описанные выше алгоритмы для получения обратной связи от среды и сопоставления локальных поощрений с глобальной целью. Первый шаг алгоритма заключается в фиксации исходных Q-значений и параметров СО, таких как α , γ и ϵ_{update} . Затем каждый агент, выполняющий алгоритм двойной Q-маршрутизации, читает заголовок сообщения с информацией о среде, полученного от другого агента, и посылает сообщения обратной связи. Следующим шагом является выполнение оптимального действия в соответствии с усвоенной в результате обучения политикой. Наконец, агент получает поощрение или наказание от среды (агент может быть частью среды для другого агента). Алгоритм

мы планирования, наказания и «муравья» выполняются одновременно и помогают сократить время обнаружения локальной оптимальной политики для каждого агента, выполняющего этот алгоритм.

Заключение

Оптимизация общих бизнес-процессов современных предприятий является актуальной проблемой. Ограничения традиционных подходов к решению задачи динамической глобальной оптимизации АСП заключаются в невозможности работать с неполной информацией, в условиях сложных динамических взаимодействий между элементами либо в необходимости централизации управления и информации. При этом большая часть эвристических методов не гарантирует глобальную оптимизацию системы.

Задача динамической оптимизации АСП нами решается в рамках теории КОИН. Построена модель АСП и разработаны алгоритмы коллективного обучения (двойной Q-маршрутизации). Предлагаемый подход основывается на динамическом построении модели среды каждым агентом во время моделирования (с использованием алгоритмов коллективного обучения). В результате он получает возможность принимать локальные решения по отношению к изменяющейся конфигурации сети поставок и к любым динамическим изменениям в производственной программе, применяя модели управления в реальном времени и модели повторной оптимизации.

Приложение

Алгоритм двойной Q-маршрутизации и его компоненты

При обозначении агентов-производителей введен дополнительный индекс, определяющий эшелон АСП, к которому относится соответствующий агент. При этом, без потери общности алгоритмы разработаны для трехэшелонной АСП, где эшелоны обозначены индексами x, y, z .

Алгоритм 1: Алгоритм планирования

*В каждый момент ε_update
 послать update-message всем соседям с запросом их оценок всех известных продуктов
 если (update-message получено)
 тогда отправить update-back-message агенту-источнику update-message с оценками $Q^H_{(x(t), a_{x(t)})}(t)$ всех известных продуктов, появившихся в момент t
 если (update-back-message получено)
 тогда обновить Q-значение таким же способом, как и в случае environment-message*

Алгоритм 2: Алгоритм «муравья»

*Если (продукт прибывает на DWA)
 тогда DWA генерирует сообщение ant-message, если время w_ant уже прошло
 если (агент M_x получает ant-message от соседнего агента M_y или DWA)
 тогда прочитать оценку $Q^A_{(x(t), a_{x(t)})}(t)$ из заголовка ant-message
 получить лучшую оценку на текущий момент времени $Q^M_{(x(t), a_{x(t)})}(t)$
 если $(Q^M_{(x(t), a_{x(t)})}(t) > Q^A_{(x(t), a_{x(t)})}(t))$ и (цикл не обнаружен)
 тогда обновить Q-значение, используя $Q^M_{(x(t), a_{x(t)})}(t)$
 в противном случае не обновлять*

Алгоритм 3: Алгоритм наказания

*Если (punishment-message получено M_y от M_z)
 тогда вычислить вторую лучшую оценку $Q^M_y_{(x(t), z')}(t)$ для доставки на DWA путем использования линии, которая бы не являлась $l_{y,z}$ отправить сообщение всем соседним агентам-производителям M_{xi}
 получить вторую лучшую оценку каждого соседнего агента-производителя M_{xi}
 выбрать лучшую оценку среди всех оценок соседей: $\arg \min Q^M_{xi}_{(x(t), y')}(t)$
 если (вторая оценка $Q^M_y_{(x(t), y')}(t)$ существует)
 тогда
 если (лучшая оценка $\arg \min Q^M_{xi}_{(x(t), y')}(t)$ соседей существует)
 тогда
 если $\left(\left(Q^M_y_{(x(t), z')}(t) < \left(\arg \min Q^M_{xi}_{(x(t), y')}(t) \right) \right) \right)$
 тогда наказать линию $l_{y,z}$: $Q^M_y_{(x(t), z)}$
 =вторая оценка $Q^M_y_{(x(t), z')}(t) + \Delta$
 в противном случае наказать линию $l_{xi,y}$:
 отправить punishment-message
 в противном случае наказать линию $l_{y,z}$:
 $Q^M_y_{(x(t), z)}$ =вторая оценка $Q^M_y_{(x(t), z')}(t) + \Delta$
 в противном случае
 если (вторая лучшая оценка $\min Q^M_{xi}_{(x(t), y')}(t)$ соседей существует)*

тогда наказать линию $l_{xi,y}$: $Q_{(x(t),y)}^{M_{xi}}(t)$
 = вторая оценка $Q_{(x(t),y')}^{M_{xi}}(t) + \Delta$

отправить *punishment-message* с оценкой

Алгоритм 4: Алгоритм двойной Q-маршрутизации

Инициализировать в момент $t = 0$: все Q-значения $Q_{x(t),a_{x(t)}}$ с большими значениями, параметры стимулируемого обучения: $\alpha, \gamma, \epsilon_update, w, w_ants$

Повторить

обновить момент времени t

если (материал получен агентом-производителем M_i)

тогда считать входной вектор x из заголовка материала и переменных среды отправить сообщение агенту M_i , к которому поступает материал со значением функции усиления $r_{(t+1)}$ и оценкой $Q_{(x(t),a_{x(t)})}^u(t)$

выполнить операцию O_q и выбрать действие по маршрутизации полуфабриката

$a_{x(t)} = M_j$ в функции входного вектора x путем использования стратегии ϵ_greedy , полученной из $Q_{(x(t),a_{x(t)})}(t)$

отправить материал следующему агенту-производителю $a_{x(t)} = M_j$ на следующем временном шаге получить сообщение от агента M_j со значением функции усиления $r(t+1)$ и оценкой

$Q_{x(t+1),a_{x(t+1)}}(t+1)$
 применить правило обновления Q-оценки:

$$Q_{(x(t),a_{x(t)})}(t+1) = Q_{(x(t),a_{x(t)})}(t) + \alpha \left[r(t+1) + \gamma \min_{a_{x(t+1)}} Q_{(x(t+1),a_{x(t+1)})}(t+1) - Q_{(x(t),a_{x(t)})}(t) \right]$$

алгоритм планирования ϵ_update
 алгоритм наказания
 алгоритм «муравья»

пока $x(t)$ — не конечное состояние

Окончание следует.

Литература

- Nah F., Rosemann M., Watson E. Guest editorial: E-business Process Management // Business Process Management J. Emerald Group Publishing Limited. 2004. Vol. 10. N. 1. P. 1–15.
- Emelyanov V. V. Combining multi-agent approach with intelligent simulation in resources flow management // Proc. of the Int. Conf. on Fuzzy Sets and Soft Computing in Economics and Finance FSSCEF. St. Petersburg, Russia / St. Petersburg State Polytechnical University, 2004. Vol. II. P. 311–320.
- Wang W., Ryu J., Rivera D. et al. A Model Predictive Control Approach for Managing Semiconductor Manufacturing Supply Chains under Uncertainty // Annual AIChE Meeting. San Francisco, CA: Omnipress, 2003. P. 1–34.
- Fox M., Barbuceanu M., Teigen R. Agent-Oriented Supply-Chain Management // Int. J. of Flexible Manufacturing Systems. Amsterdam, The Netherlands: Springer Netherlands, 2000. Vol. 12. N. 2–3. P. 165–188.
- Radjou N. Is It Prime Time For Agents In Business? // Proc. of the AAMAS'04. N. Y.: IEEE Computer Society Press, 2004. P. 6–7.
- Wolpert D., Kagan T. An introduction to collective intelligence // Technical Report NASA-ARCIC-99-63. – Mountain View, CA: NASA Ames Research Center, 1999. 88 p.
- Littman M., Boyan J. A distributed reinforcement learning scheme for network routing // Proc. of the Int. Workshop on Applications of Neural Networks to Telecommunications. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1993. P. 45–51.
- Watkins C. Learning from Delayed Rewards: PhD Dissertation. – Cambridge, MA: Cambridge University, 1989.
- Gaither N., Frazier G. Operations Management. – Cincinnati, OH: Southwestern Thomson Learning, 2002. – 864 p.
- Shapiro J. F. Modeling the Supply Chain. 2nd Edition. Duxbury: Thomson Learning Inc., 2007. – 618 p.
- Hoover W., Eloranta E., Holmström J., Huttunen K. Managing the Demand-Supply Chain: Value Innovations for Customer Satisfaction. – N. Y.: John Wiley & Sons, 2001. – 272 p.
- Julka N., Srinivasan R., Karimi I. Agent-based supply chain management-1: framework // Computers & Chemical Eng. Shannon, Ireland: Elsevier Ireland Ltd, 2002. Vol. 26. N. 12. P. 1755–1769.
- Smirnov A., Sheremetov L., Chilov N., Romero-Cortes J. Soft-computing Technologies for Configuration of Cooperative Supply Chain // Applied Soft Computing. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2004. Vol. 4. N. 1. P. 87–107.
- Swaminathan J. M., Smith S. F., Sadeh N. M. Modeling Supply Chain Dynamics: A Multiagent Approach // Decision Sciences. Atlanta, GA: American

- Institute for Decision Sciences, 1998. Vol. 29. N. 3. P. 607–631.
15. **Moyaux T., Chaib-draa B., D'Amours S.** Supply Chain Management and Multiagent Systems: An Overview // Multiagent based Supply Chain Management. Ser. Studies in Computational Intelligence. Heidelberg: Physica Verlag, 2006. Vol. 28. P. 1–27.
16. **Deshpande U., Gupta A., Basu A.** Multi-agent Modeling and Fuzzy Task Assignment for Real-Time Operation in a Supply Chain // Multiagent based Supply Chain Management. Ser. Studies in Computational Intelligence. Heidelberg: Physica Verlag, 2006. Vol. 28. P. 179–202.
17. **Sutton R., Barto A.** Reinforcement Learning: An Introduction. — Cambridge, MA: The MIT Press, 1998. — 342 p.
18. **Bellman R.** On a routing problem // Quarterly of Applied Mathematics. Providence, RI: Brown University, 1958. Vol. 16. P. 87–90.
19. **Chandra C., Kumar S., Smirnov A. V.** E-Management of Scalable Cooperative Supply Chains: Conceptual Modeling and Information Technologies Framework // Human Systems Management. Amsterdam, The Netherlands: IOS Press, 2001. Vol. 20. N. 2. P. 83–94.
20. **Rocha-Mier L. E.** Learning in a Neural Collective Intelligence: Internet packet routing application: PhD Dissertation. — Grenoble, France: National Polytechnic Institute of Grenoble, 2002.
21. **Dorigo M., Stützle T.** Ant Colony Optimization. — Cambridge, MA: The MIT Press, 2004. — 319 p.

ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ МОЛОДЕЖНАЯ ШКОЛА «БИМЕДИЦИНСКАЯ ИНЖЕНЕРИЯ»
26–30 октября 2009 г.

Место проведения: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина).

Адрес: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

Задачи проведения научной школы

Определение перспективных инновационных направлений научных исследований и разработок в области биомедицинской инженерии в России и за рубежом. Обсуждение актуальных теоретических и практических достижений в области биомедицинской инженерии. Поиск и выявление оптимальных путей интеграции научных знаний и практических достижений в области биомедицинской инженерии. Активное привлечение молодых исследователей к научному творчеству.

Формы проведения научной школы

Чтение лекций ведущими отечественными и зарубежными специалистами по фундаментальным и прикладным направлениям развития биомедицинской инженерии.

Практические занятия.

Дискуссии и обсуждение актуальных проблем биомедицинской инженерии с ведущими специалистами за круглым столом.

Выполнение и защита индивидуальных заданий (проектов) участниками научной школы.

Организация конкурса научных работ молодых ученых, аспирантов и специалистов.

Лекции, практические занятия, дискуссии и круглые столы будут проводиться ведущими отечественными и зарубежными специалистами в области биомедицинской инженерии.

По завершении работы научной школы участникам будет выдан сертификат о повышении квалификации в области биомедицинской инженерии, победители

конкурса научных работ будут отмечены грамотами и призами.

Издание трудов научной школы

Лучшие работы участников школы по результатам выполнения ими индивидуальных заданий (проектов) будут опубликованы в научно-практических журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций. Будут изданы конспекты лекций, прочитанные ведущими специалистами в области биомедицинской инженерии, а также материалы дискуссий и круглых столов.

Контрольные сроки

Желающие принять участие в работе молодежной научной школы должны в срок до 10 октября 2009 г. направить в адрес оргкомитета заявку по установленной форме.

Дополнительная информация и справки

Организационный комитет конференции: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), кафедра Биомедицинской электроники и охраны среды.

197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5. Подробная информация о проводимой научной школе представлена на сайте университета <http://www.eltech.ru>, раздел Всероссийская научная молодежная школа «Биомедицинская инженерия».

Эл. адрес: bme@eltech.ru

Телефон/факс: (812) 234–01–33.

УДК 681.3.06

НАСЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТНЫХ КЛАССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯЗЫКОВ ПРОГРАММИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ЯЗЫКА RUBY)

К. И. Тимофеев,
системный архитектор
компания «DataArt»

А. А. Астафуров,
аспирант

А. А. Шалыто,
доктор техн. наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,
механики и оптики

Рассматриваются достоинства применения динамических языков программирования для реализации наследования автоматных классов. Предлагаемый подход иллюстрируется примером реализации функциональности регистрации пользователей на сайте.

Ключевые слова — объектно-автоматное программирование, наследование автоматных классов, динамические языки программирования.

Введение

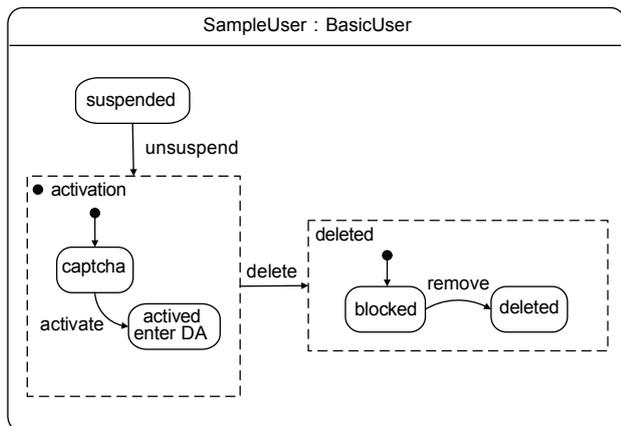
С каждым годом динамические языки программирования все шире используются для разработки программного обеспечения. Так, в 2008 г. отношение динамических языков к языкам со статической типизацией составило около 40 % [1]. Динамические языки программирования позволяют расширять программу во время ее выполнения за счет создания новых методов и классов, а также использования макросов [2]. Язык Ruby является динамическим и входит в десятку самых популярных языков программирования 2008 г. [1]. На нем, в частности, разрабатывается фреймворк для создания веб-приложений Ruby on Rails [3], который является Open Source-проектом. Его особенность — наличие гибкого механизма расширения функциональности с помощью плагинов (компонентов, которые можно добавить в приложение Ruby on Rails). Одним из таких плагинов является Restful-authentication [4], расширяющий веб-приложение функциональностью регистрации пользователей. Этот плагин применяется в 96 % [5] приложений Ruby on Rails и реализован с использованием конечных автоматов.

Рассматриваемый плагин использует библиотеку Acts as State Machine [6], которая не позволяет сохранить иерархию родительского автомата при наследовании и не имеет вложенных групп состояний. Это приводит к дублированию кода, затрудняет отладку, а также делает невозможным изоморфное построение модели по коду при необходимости. В работе [2] был предложен метод наследования автоматных классов, для поддержки которых разработана библиотека State Machine on Steroids. Она использует расширенную динамическими свойствами объектно-ориентированную парадигму, суть которой состоит в том, что автоматные классы создаются во время работы программы. Использование этого метода, по мнению авторов, позволит устранить указанные выше недостатки реализации плагина Restful-authentication.

Цель настоящей работы — сравнение указанных подходов к наследованию автоматных классов на примере плагина Restful-authentication.

Используемая графическая нотация

В качестве графической модели предлагается использовать диаграмму состояний UML 2 [7],



■ Рис. 1. Расширенная графическая нотация

расширенную графической нотацией для наследования автоматных классов, предложенной в работе [8], так как в UML 2 невозможно отобразить наследование автоматов.

В примере использования расширенной графической нотации (рис. 1) отображен автоматный класс SampleUser, унаследованный от родительского автоматного класса BasicUser, который содержит в себе следующие изменения:

- добавлена новая группа deleted, состоящая из двух состояний blocked, deleted. Состояние blocked является начальным;
- переопределена группа activation — начальным состоянием является captcha. Добавлен новый переход из этой группы в новую группу deleted;
- добавлено новое состояние suspended, которое имеет переход на группу activation.

Описание проблемы

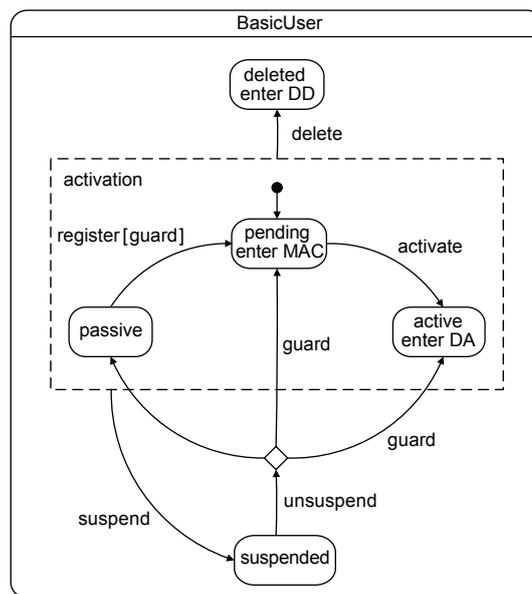
Рассмотрим плагин Restful-authentication подробнее. Пусть, например, для успешной регистрации пользователь должен выполнить три действия:

- 1) заполнить регистрационную форму на сайте;
- 2) получить письмо с кодом активации;
- 3) подтвердить регистрацию, введя полученный код в специальном разделе сайта.

В случае, если пользователь не зарегистрируется в течение заданного времени или несколько раз неверно введет код активации, он будет заблокирован и не сможет больше зарегистрироваться на сайте.

Администратор может как разблокировать пользователя, так и удалить его из системы.

Автомат регистрации базового пользователя (BasicUser), представленный на рис. 2 с помощью расширенной графической нотации, состоит из группы activation и состояний suspended и deleted. Вложенная группа activation включает три состоя-



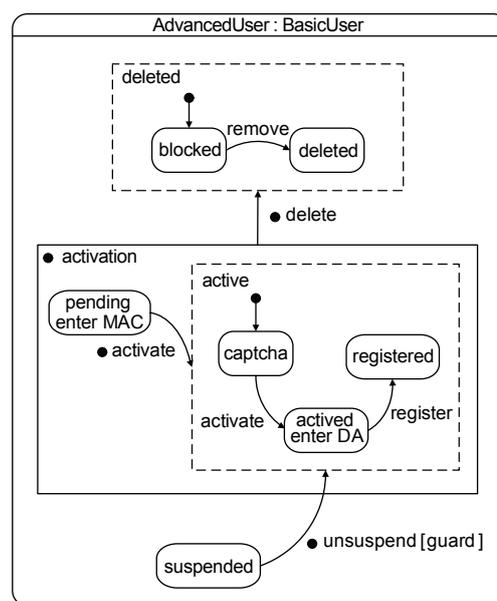
■ Рис. 2. Автомат регистрации базового пользователя

ния: passive, active и pending, последнее из которых является начальным.

В этом автомате определены следующие переходы:

- delete — удалить пользователя из системы;
- suspend — перевести пользователя в состояние ожидания в случае следующих событий:

- пользователь не активировал аккаунт в течение семи дней с момента регистрации;
- пользователь ввел три раза неверный код активации;



■ Рис. 3. Автомат регистрации расширенного пользователя

register — пользователь ввел регистрационные данные, однако еще не подтвердил регистрацию;
 activate — пользователь ввел регистрационные данные и успешно подтвердил активацию;
 unsuspend — администратор может предоставить пользователю возможность повторно зарегистрироваться.

Автомат AdvancedUser (рис. 3) унаследован от автомата BasicUser и обладает следующей функциональностью.

1. Пользователь после ввода кода активации должен совершить два дополнительных действия: корректно распознать Captcha (для удаления нежелательных автоматических регистраций) и записать данные в пользовательском разделе.

Для этого создадим вложенную группу active.

2. Удаление пользователя проходит в два этапа: на первом пользователь блокируется, однако его сообщения остаются в системе, а на втором из системы удаляется не только пользователь, но и все его данные.

Для этого создадим новую вложенную группу deleted.

Реализация наследования с использованием библиотеки Acts as State Machine

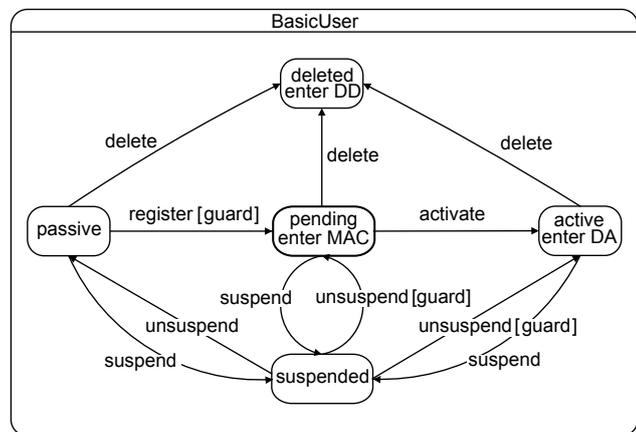
Рассмотрим класс базового пользователя (BasicUser) в плагине Restful-authentication с использованием библиотеки Acts as State Machine. Она предоставляет четыре метода:

acts_as_state_machine :initial — устанавливает начальное состояние автомата;

state — создает состояние. В качестве необязательных аргументов принимает лямбда-функции [2] — действия при входе в состояние и при выходе из него;

event — именованный переход;

transitions — определяет, из какого и в какое состояние будет осуществлен именованный пере-



■ Рис. 4. Автомат регистрации базового пользователя без вложенных групп

ход. В качестве необязательного аргумента метод принимает лямбда-функцию — условие, при котором осуществляется переход.

Эта библиотека не поддерживает вложенные группы. Поэтому для изоморфного переноса требуется модифицировать автомат BasicUser, как показано на рис. 4.

Ниже приведен код на языке Ruby, который реализует эту модель:

```

class BasicUser
  acts_as_state_machine :initial => :pending

  state :passive
  state :pending, :enter => :make_activation_code
  state :active, :enter => :do_activate
  state :suspended
  state :deleted, :enter => :do_delete

  event :register do
    transitions :from => :passive, :to => :pending,
      :guard => Proc.new {|u|
        !(u.encrypted_password.blank? && u.password.blank?)
      }
  end

  event :activate do
    transitions :from => :pending, :to => :active
  end

  event :suspend do
    transitions :from => [:passive, :pending, :active],
      :to => :suspended
  end

  event :delete do
    transitions :from => [:passive, :pending, :active,
      :suspended], :to => :deleted
  end

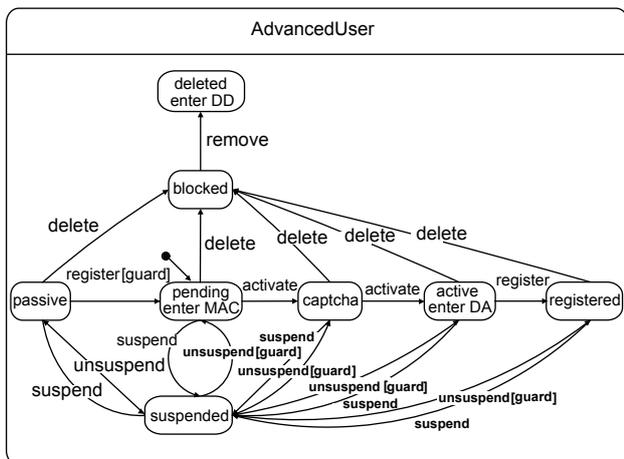
  event :unsuspend do
    transitions :from => :suspended, :to => :active,
      :guard => Proc.new {|u|
        u.activated_at.blank?
      }
    transitions :from => :suspended, :to => :pending,
      :guard => Proc.new {|u|
        u.activation_code.blank?
      }
    transitions :from => :suspended, :to => :passive
  end
end
    
```

Создадим новый класс AdvancedUser (рис. 5), который будет наследован от класса BasicUser. Он наследует всю внутреннюю структуру класса BasicUser, созданную методами библиотеки Acts as State Machine. Так как эта библиотека не поддерживает вложенные группы, то иерархия родительского автомата BasicUser в классе AdvancedUser будет потеряна.

Ниже приведен код, реализующий эту модель:

```

class AdvancedUser < BasicUser
  state :captcha
  state :registered
  state :blocked
end
    
```



■ **Рис. 5.** Модель автомата в классе AdvancedUser после потери иерархии родительского автомата

```

event :activate do
  transitions :from => :captcha, :to => :activated
  transitions :from => :pending, :to => :captcha
end

event :register do
  transitions :from => :activated, :to => :registered
end

event :unsuspend do
  transitions :from => :unsuspend, :to => :captcha
end

event :suspend do
  transitions :from => [:passive, :pending, :active,
:suspended, :captcha, :registered], :to => :suspended
end

event :delete do
  transitions :from => [:passive, :pending, :active,
:suspended, :captcha, :registered], :to => :deleted
end
    
```

Недостатками этого решения являются:

- потеря иерархии родительского автомата, при этом автоматический изоморфный перенос кода в модель невозможен;
- отсутствие вложенных групп состояний, что приводит к увеличению необходимого числа переходов.

Реализация наследования с использованием библиотеки State Machine on Steroids

Для устранения недостатков предыдущего решения авторами разработана библиотека State Machine on Steroids. Она использует динамические языки программирования для реализации классов автомата. Библиотека предоставляет шесть методов, из которых четыре аналогичны

предоставляемым библиотекой Acts as State Machine, а также:

- automaton — метод принимает в качестве аргумента блок, для которого определен DSL-синтаксис (Domain Specific Language) автомата [2];
- group — создание вложенной группы состояний.

Реализуем автомат, представленный на рис. 2:

```

class BasicUser
  include StateMachineOnSteroids

  automaton :user, :initial => :activation do
    state :deleted

    group :activation, initial => :pending do
      state :pending do
        transition :activate, :to => :activated
      end

      state :passive do
        transition :register, :to => :pending,
          :guard => Proc.new {|u|
            !u.encrypted_password.blank? && u.password.blank?
          }
      end

      state :activated

      transition :suspend, :to => :suspended
      transition :delete, :to => :deleted
    end

    state :suspended do
      event :unsuspend do
        transition :to => :active,
          :guard => Proc.new {|u|
            !u.activated_at.blank?
          }
        transition :to => :pending,
          :guard => Proc.new {|u|
            !u.activation_code.blank?
          }

        transition :to => :passive
      end
    end
  end
end
    
```

В этом коде каждый вызов метода библиотеки State Machine on Steroids создает класс. Благодаря этому при наследовании сохраняется структура родительского автомата BasicUser.

Реализуем наследованный класс AdvancedUser (см. рис. 3):

```

class AdvancedUser < BasicUser
  automaton :user do
    group :deleted, initial => :blocked do
      state :blocked do
        transition :remove, :to => :deleted
      end

      state :user::activation::deleted
    end

    group :activation do
      group :active, initial => :captcha do
        state :captcha do
          transition :activate, :to => :activated
        end
      end
    end
  end
end
    
```

```

end
state :user::activated do
  transition :register, :to => :registered
end
state :registered
end
end
transition :user::delete, :to => :deleted
transition :user::activate, :to => :active
state :suspended do
  event :user::unsuspend, :to => :active
end
end
end
end

```

При использовании библиотеки State Machine on Steroids удалось устранить указанные недостатки библиотеки Acts as State Machine:

- при наследовании сохраняется иерархия родительского автомата. Это позволяет обратиться к ранее созданным классам, например, к классу `AdvancedUser::Deleted`, а также решить задачу автоматического изоморфного переноса кода в модель;

- реализован метод для создания групп состояний, что сокращает необходимое число переходов при описании автомата в исполняемом коде.

Сравнение библиотек Acts as State Machine и State Machine on Steroids

Библиотека State Machine on Steroids сохраняет все достоинства динамических и объектно-ориентированных свойств языка Ruby, такие как:

- возможность создания кода в терминах предметной области. В результате эксперты могут понимать, проверять и модифицировать написанный код;
- обеспечение возможности разработки самодокументированного кода;
- повышение качества, надежности и сопровождаемости программ;
- сохранение иерархии автоматов при наследовании.

Еще одним достоинством библиотеки State Machine on Steroids является возможность изоморфного переноса графической нотации в код. При этом, в частности, удастся исключить дублирование кода, которое возникает при использова-

■ Сравнение эффективности библиотек

Библиотека	Переходы	Состояния	Группы
Acts as State Machine	20	8	—
State Machine on Steroids	9	8	3

нии библиотеки Acts as State Machine при реализации групповых переходов.

В таблице показано необходимое число переходов и состояний для реализации автомата, представленного на рис. 3, с использованием указанных выше библиотек. Отметим, что библиотека State Machine on Steroids за счет исключения избыточности упрощает код.

Заключение

В настоящей работе были рассмотрены две библиотеки. Их сравнение выполнено на примере модификации функциональности регистрации пользователей в плагине Restful-authentication.

Библиотеки позволяют переносить графическую нотацию в программный код. При этом разработанная библиотека State Machine on Steroids сохраняет иерархию родительского автомата при наследовании и обеспечивает изоморфную реализацию вложенных групп состояний.

Кроме того, при использовании ее возможен реверсинжиниринг — автоматический изоморфный перенос кода в графическую модель.

Литература

1. **ТЮБЕ.** TIOBE Software: Tiobe Index. <http://www.tiobe.com/index.php/content/paperinfo/tpci/index.html>
2. **Тимофеев К. И., Астафуров А. А., Шалыто А. А.** Наследование автоматных классов с использованием динамических языков программирования на примере Ruby: Software Engineering Conference. Russia, 2008. <http://www.secr.ru/?pageid=4548&submissionid=5270>
3. **David H. H.** Ruby on Rails. <http://www.rubyonrails.com/>
4. **Grant G.** Restful Authentication Generator. <http://github.com/technoweenie/restful-authentication/tree/master>
5. **Szinek P.** Rails Rumble Observations. P. II: Trends in gem/plugin usage. <http://www.rubyrailways.com/rails-rumble-observations-part-ii-trends-in-gem-plugin-usage/>
6. **Scott B.** Acts as State Machine. http://agilewebdevelopment.com/plugins/acts_as_state_machine.
7. **Object Management Group.** Official UML Specification. <http://www.uml.org/#UML2.0>
8. **Шопырин Д. Г., Шалыто А. А.** Графическая нотация наследования автоматных классов // Программирование. 2007. № 5. С. 62–74.

УДК 681.3

ГОМОМОРФИЗМ КОНЕЧНЫХ ГРУПП ВЕКТОРОВ МАЛОЙ РАЗМЕРНОСТИ И СИНТЕЗ СХЕМ ЦИФРОВОЙ ПОДПИСИ

П. А. Молдовяну,

канд. техн. наук, начальник службы главного метролога

Н. А. Молдовян,

доктор техн. наук, главный научный сотрудник
ФГУП НИИ «Вектор»

Е. С. Дернова,

аспирант

А. А. Костина,

аспирант

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Описывается гомоморфное отображение мультипликативной конечной группы векторов в мультипликативную группу конечного поля, над которым они заданы. Установленный гомоморфизм имеет значение для криптоанализа алгоритмов электронной цифровой подписи на основе сложности задачи дискретного логарифмирования в циклических подгруппах нециклической группы векторов. Предложен алгоритм электронной цифровой подписи, в котором учитывается наличие установленного гомоморфизма.

Ключевые слова — векторное пространство, гомоморфизм, конечные группы, многомерная цикличность, цифровая подпись.

Введение

В качестве криптографического примитива алгоритмов электронной цифровой подписи (ЭЦП) недавно были предложены векторные конечные поля (ВКП) и векторные конечные группы, задаваемые в конечных векторных пространствах в зависимости от типа определяемой операции умножения векторов [1]. В частности, схемы ЭЦП, обладающие достаточно высокой производительностью, разработаны на основе сложности задачи извлечения корней в конечных нециклических группах двумерных векторов [2], а векторные конечные поля перспективны для задания на их основе эллиптических кривых, что позволяет значительно ускорить алгоритмы эллиптической криптографии за счет возможности распараллеливания операции умножения в базовом поле [1]. Мультипликативные группы векторов в общем случае являются нециклическими, однако они имеют характерное строение, которое можно описать в терминах многомерной цикличности [3]. Это понятие включает в себя и циклическое строение конечных групп как случай од-

номерной цикличности. Размерность цикличности строения некоторой группы векторов определяется типом задаваемой операции умножения векторов. Случаи формирования групп с одномерной циклическостью соответствуют заданию векторных конечных полей [3].

Построение алгоритмов ЭЦП на основе использования групп с многомерной циклическостью и их особенности представлены в работе [3]. Однако такие конструкции являются новыми и требуют выполнения значительных работ по их криптоанализу, т. е. исследованию стойкости ко всевозможным типам атак. Частные виды криптоанализа основываются на поиске гомоморфизмов.

В данной работе описывается достаточно общий гомоморфизм мультипликативной конечной группы векторов в мультипликативную группу конечного поля, над которым задано векторное пространство. Данное гомоморфное отображение и связанные с ним потенциальные атаки учтены в построенной схеме ЭЦП, использующей многомерность циклического строения групп векторов.

Многомерная цикличность строения конечных групп векторов

Рассмотрим конечные множества m -мерных векторов над конечным полем, которые представляются в виде (a, b, \dots, q) или в виде $ae + bi + \dots + qw$, где e, i, \dots, w — формальные базисные векторы и $a, b, \dots, q \in GF(p^s)$ — координаты вектора, являющиеся элементами конечного поля $GF(p^s)$, где p — простое число (характеристика поля) и $s \geq 1$ — степень расширения поля. Сложение векторов определяется по формуле

$$(a, b, \dots, q) + (x, y, \dots, z) = (a + x, b + y, \dots, q + z).$$

Одномерные векторы вида kv , где $k \in GF(p^s)$ и v — некоторый формальный базисный вектор, входящие во вторую форму записи векторов, представляют собой компоненты вектора. Операция умножения векторов (\circ) определяется по естественному правилу попарного перемножения всех компонентов векторов-сомножителей по формуле

$$(ae + bi + \dots + qw) \circ (xe + yi + \dots + zw) = axe \circ e + aye \circ i + \dots + aze \circ w + bxi \circ e + byi \circ i + \dots + bzi \circ w + \dots + qxw \circ e + qyw \circ i + \dots + qzw \circ w,$$

в которой вместо каждого из произведений двух базисных векторов подставляется однокомпонентный вектор, определяемый по специально задаваемой таблице умножения базисных векторов (ТУБВ). Координата этого однокомпонентного вектора называется коэффициентом растяжения. Совокупность клеток ТУБВ, в которых присутствует один и тот же коэффициент растяжения, определяет тип распределения этого коэффициента. В случае, когда определенная с помощью ТУБВ операция умножения векторов является ассоциативной, конечное векторное пространство является векторным конечным кольцом (ВКК). При этом мультипликативная группа кольца генерируется некоторым набором из r векторов Z_1, Z_2, \dots, Z_r , называемым системой образующих. Система образующих, включающая минимально возможное число элементов группы, называется минимальной. Любой вектор из этой группы представим в виде произведения некоторых степеней элементов Z_1, Z_2, \dots, Z_r . Частный вид такого строения, относящийся к случаю равенства порядков всех элементов минимальной системы образующих, называется строением с r -мерной цикличностью [3]. Конкретное значение r определяется значением m , распределением базисных векторов в ТУБВ, распределением ко-

■ *Общий тип распределения растягивающих коэффициентов ϵ и μ*

\circ	e	i	j	k	u	v	z
e	e	i	j	k	u	v	z
i	i	ϵj	ϵk	ϵu	ϵv	$\epsilon \dots$	$\epsilon \dots$	ϵz	$\epsilon \mu e$
j	j	ϵk	ϵu	ϵv	$\epsilon \dots$	$\epsilon \dots$	ϵz	$\epsilon \mu e$	μi
k	k	ϵu	ϵv	$\epsilon \dots$	$\epsilon \dots$	ϵz	$\epsilon \mu e$	μi	μj
u	u	ϵv	$\epsilon \dots$	$\epsilon \dots$	ϵz	$\epsilon \mu e$	μi	μj	μk
v	v	$\epsilon \dots$	$\epsilon \dots$	ϵz	$\epsilon \mu e$	μi	μj	μk	μu
...	...	$\epsilon \dots$	ϵz	$\epsilon \mu e$	μi	μj	μk	μu	μv
...	...	ϵz	$\epsilon \mu e$	μi	μj	μk	μu	μv	$\mu \dots$
z	z	$\epsilon \mu e$	μi	μj	μk	μu	μv	$\mu \dots$	$\mu \dots$

эффициентов растяжения в ТУБВ и значением этих коэффициентов. Особый интерес представляет случай одномерной цикличности, при реализации которой образуются ВКП.

Векторные конечные поля формируются при следующих условиях [4]:

1) размерность векторного пространства является делителем числа $p^s - 1$, т. е. $m | p^s - 1$;

2) в ТУБВ присутствуют коэффициенты растяжения, которые не могут быть представлены в виде d -й степени какого-либо элемента базового поля $GF(p^s)$, где $s \geq 2, d > 1$ — нетривиальный делитель размерности m .

При задании векторов в качестве поля $GF(p)$ используется кольцо Z_p , а в качестве поля $GF(p^s)$, где $s \geq 2$, — конечные поля многочленов. Существует два общих типа распределения коэффициентов растяжения (таблица), обеспечивающих формирование ВКП [5] для произвольных значений m . Для заданного значения m имеется большее число других вариантов ТУБВ, которые зависят от конкретного значения m . Для любых ТУБВ, задающих коммутативное и ассоциативное умножение векторов, имеет место формирование конечных групп векторов с многомерной цикличностью, включая одномерную цикличность как частный случай.

Гомоморфизм конечных групп двухмерных и трехмерных векторов

При $m = 2$ общие правила умножения базисных векторов, обеспечивающие свойства коммутативности и ассоциативности операции умножения векторов, описываются следующими соотношениями: $e \circ e = e$; $e \circ i = i \circ e = i$ и $i \circ i = \epsilon e$, в соответствии с которыми можно записать формулу для умножения векторов $Z = (ae + bi)$ и $Z' = (a'e + b'i)$:

$$Z' = Z \circ Z' = (ae + bi) \circ (a'e + b'i) = (aa' + \epsilon bb')e + (ab' + ba')i. \tag{1}$$

В двухмерном случае другие варианты задания ассоциативного умножения векторов не установлены. Нейтральным элементом по умножению является вектор $E = (1, 0)$. Множество всех векторов $\{Z\}$ такое, что каждому вектору Z может быть сопоставлен обратный вектор Z^{-1} , для которого выполняется соотношение $Z \circ Z^{-1} = E$, образует конечную группу. Рассмотрим решение уравнений вида $Z \circ X = E$, которое можно представить следующим образом:

$$(ae + bi) \circ (xe + yi) = 1e + 0i.$$

Для определения обратного значения Z^{-1} следует решать систему из двух линейных уравнений с двумя неизвестными x и y

$$\begin{cases} ax + \varepsilon by = 1 \\ bx + ay = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Рассмотрим множество всех двухмерных векторов, заданных над конечным полем F , с определенной выше операцией умножения. Имеет место следующий гомоморфизм.

Утверждение 1. Главный определитель системы (2) задает гомоморфное отображение множества двухмерных векторов над конечным полем в конечное поле, над которым заданы векторы.

Доказательство: Пусть $Z = (a, b)$, $Z' = (a', b')$ и $Z'' = (a'', b'')$. Запишем главные определители системы (2) для векторов Z , Z' и Z'' , причем координаты вектора Z'' сразу выразим через координаты векторов Z и Z' по формуле (1):

$$\Delta(Z) = \begin{vmatrix} a & \varepsilon b \\ b & a \end{vmatrix}; \quad \Delta(Z') = \begin{vmatrix} a' & \varepsilon b' \\ b' & a' \end{vmatrix}$$

$$\text{и } \Delta(Z'') = \begin{vmatrix} aa' + \varepsilon bb' & \varepsilon(ab' + ba') \\ ba' + ab' & \varepsilon bb' + aa' \end{vmatrix}.$$

Непосредственная проверка показывает, что $\Delta(Z) \cdot \Delta(Z') = \Delta(Z'')$, т. е. образ произведения равен произведению образов. Последнее означает, что отображение $\varphi(Z) = \Delta(Z)$, ставящее в соответствие каждому двухмерному вектору Z некоторый элемент базового поля, является гомоморфизмом. Утверждение доказано.

В синтезе алгоритмов ЭЦП на основе ВКК используются мультипликативные группы векторов. Очевидно, что доказанный гомоморфизм ВКК в базовое поле задает также и гомоморфизм мультипликативной группы векторов в мультипликативную группу базового поля. Отличие только в том, что гомоморфизм ВКК в базовое поле дополнительно включает отображение необратимых векторов в нулевой элемент базового поля. Это замечание имеет силу также и для случаев других размерностей векторного пространства, рассматриваемых ниже.

При $m = 3$ общие правила умножения базисных векторов, обеспечивающие свойства коммутативности и ассоциативности операции умножения векторов, описываются соотношениями $e \circ e = e$; $e \circ i = i \circ e = i$; $e \circ j = j \circ e = j$; $i \circ i = \varepsilon j$; $i \circ j = j \circ i = \varepsilon \mu e$ и $j \circ j = \mu i$, из которых вытекает следующая формула для умножения векторов $Z = (ae + bi + cj)$ и $Z' = (a'e + b'i + c'j)$:

$$\begin{aligned} Z'' = Z \circ Z' &= (ae + bi + cj) \circ (a'e + b'i + c'j) = \\ &= (aa' + \varepsilon \mu bc' + \varepsilon \mu cb'e) + (ab' + ba' + \mu cc')i + \\ &\quad + (ac' + \varepsilon bb' + ca'j). \end{aligned} \quad (3)$$

Легко проверить, что нейтральным элементом по умножению является вектор $E = (1, 0, 0)$. Обращение вектора Z связано с решением векторного уравнения

$$(ae + bi + cj) \circ (xe + yi + zj) = 1e + 0i + 0j,$$

откуда получаем систему из трех линейных уравнений с тремя неизвестными x , y и z вида

$$\begin{cases} ax + \varepsilon \mu cy + \varepsilon \mu bz \equiv 1 \\ bx + ay + \mu cz \equiv 0 \\ cx + \varepsilon by + az \equiv 0 \end{cases} \quad (4)$$

Рассмотрим множество всех трехмерных векторов, заданных над конечным полем F , с операцией умножения. Имеет место следующий гомоморфизм.

Утверждение 2. Главный определитель системы (4) задает гомоморфное отображение множества трехмерных векторов над конечным полем в конечное поле, над которым заданы векторы.

Доказательство: Пусть $Z = (a, b, c)$, $Z' = (a', b', c')$ и $Z'' = (a'', b'', c'')$. Запишем главные определители системы (4) для векторов Z , Z' и Z'' :

$$\Delta(Z) = \begin{vmatrix} a & \varepsilon \mu c & \varepsilon \mu b \\ b & a & \mu c \\ c & \varepsilon b & a \end{vmatrix};$$

$$\Delta(Z') = \begin{vmatrix} a' & \varepsilon \mu c' & \varepsilon \mu b' \\ b' & a' & \mu c' \\ c' & \varepsilon b' & a' \end{vmatrix}$$

$$\text{и } \Delta(Z'') = \begin{vmatrix} a'' & \varepsilon \mu c'' & \varepsilon \mu b'' \\ b'' & a'' & \mu c'' \\ c'' & \varepsilon b'' & a'' \end{vmatrix}.$$

Значения этих определителей являются элементами базового поля, над которым заданы векторы. Перемножение первых двух определителей дает следующий определитель:

$$\Delta(Z) \cdot \Delta(Z') = \begin{vmatrix} aa' + \varepsilon\mu cb' + \varepsilon\mu bc' & \varepsilon\mu(ac' + ca' + \varepsilon bb') & \varepsilon\mu(ab' + \mu cc' + ba') \\ ba' + ab' + \mu cc' & \varepsilon\mu bc' + aa' + \varepsilon\mu cb' & \mu(\varepsilon bb' + ac' + ca') \\ ca' + \varepsilon bb' + ac' & \varepsilon(\mu cc' + ba' + ab') & \varepsilon\mu cb' + \varepsilon\mu bc' + aa' \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Из (3) и (5) непосредственно следует $\Delta(Z) \cdot \Delta(Z') = \Delta(Z'')$, т. е. отображение $\varphi(Z) = \Delta(Z)$, ставящее в соответствие каждому трехмерному вектору Z элемент базового поля, является гомоморфизмом. Утверждение доказано.

Гомоморфизм в четырехмерном случае

Используя ТУБВ, записанную для четырехмерного случая, легко получить формулу, непосредственно описывающую результат $Z'' = Z \circ Z'$ умножения векторов $Z = (ae + bi + cj + dk)$ и $Z' = (a'e + b'i + c'j + d'k)$:

$$\begin{aligned} Z'' &= (ae + bi + cj + dk) \circ (a'e + b'i + c'j + d'k) = \\ &= (aa' + \varepsilon\mu db' + \varepsilon\mu cc' + \varepsilon\mu bd')e + (ba' + ab' + \mu dc' + \mu cd')i + \\ &+ (ca' + \varepsilon bb' + ac' + \mu dd')j + (da' + \varepsilon cb' + \varepsilon bc' + ad')k. \end{aligned} \quad (6)$$

Единичным вектором является $E = (1, 0, 0, 0)$. Обращение вектора Z связано с решением векторного уравнения

$$(ae + bi + cj + dk) \circ (xe + yi + zj + wk) = 1e + 0i + 0j + 0k,$$

откуда вытекает система из четырех линейных уравнений с неизвестными x, y, z и w :

$$\begin{cases} ax + \varepsilon\mu dy + \varepsilon\mu cz + \varepsilon\mu dw = 1 \\ bx + ay + \mu dz + \mu cw = 0 \\ cx + \varepsilon by + az + \mu dw = 0 \\ dx + \varepsilon cy + \varepsilon bz + aw = 0 \end{cases}. \quad (7)$$

Рассмотрим множество всех четырехмерных векторов, заданных над конечным полем F , с операцией умножения. Имеет место следующий гомоморфизм.

Утверждение 3. Главный определитель системы линейных уравнений (7) задает гомоморфное отображение множества четырехмерных векторов над конечным полем в конечное поле, над которым заданы векторы.

Доказательство: Пусть $Z = (a, b, c, d)$, $Z' = (a', b', c', d')$ и $Z'' = (a'', b'', c'', d'')$. Запишем главные определители системы (7) для векторов Z, Z' и Z'' :

$$\Delta(Z) = \begin{vmatrix} a & \varepsilon\mu d & \varepsilon\mu c & \varepsilon\mu b \\ b & a & \mu d & \mu c \\ c & \varepsilon b & a & \mu d \\ d & \varepsilon c & \varepsilon b & a \end{vmatrix}; \quad \Delta(Z') = \begin{vmatrix} a' & \varepsilon\mu d' & \varepsilon\mu c' & \varepsilon\mu b' \\ b' & a' & \mu d' & \mu c' \\ c' & \varepsilon b' & a' & \mu d' \\ d' & \varepsilon c' & \varepsilon b' & a' \end{vmatrix} \quad \text{и} \quad \Delta(Z'') = \begin{vmatrix} a'' & \varepsilon\mu d'' & \varepsilon\mu c'' & \varepsilon\mu b'' \\ b'' & a'' & \mu d'' & \mu c'' \\ c'' & \varepsilon b'' & a'' & \mu d'' \\ d'' & \varepsilon c'' & \varepsilon b'' & a'' \end{vmatrix}.$$

Перемножение определителей $\Delta(Z)$ и $\Delta(Z')$ дает следующий определитель:

$$\begin{vmatrix} aa' + \varepsilon\mu db' + \varepsilon\mu cc' + \varepsilon\mu bd' & \varepsilon\mu(ad' + da' + \varepsilon cb' + \varepsilon bc') & \varepsilon\mu(ac' + \mu dd' + ca' + \varepsilon bb') & \varepsilon\mu(ab' + \mu dc' + \mu cd' + ba') \\ ba' + ab' + \mu dc' + \mu cd' & \varepsilon\mu bd' + aa' + \varepsilon\mu db' + \varepsilon\mu cc' & \mu(\varepsilon bc' + ad' + da' + \varepsilon cb') & \mu(\varepsilon bb' + ac' + \mu dd' + ca') \\ ca' + \varepsilon bb' + ac' + \mu dd' & \varepsilon(\mu cd' + ba' + ab' + \mu dc') & \varepsilon\mu cc' + \varepsilon\mu bd' + aa' + \varepsilon\mu db' & \mu(\varepsilon cb' + \varepsilon bc' + ad' + da') \\ da' + \varepsilon cb' + \varepsilon bc' + ad' & \varepsilon(\mu dd' + ca' + \varepsilon bb' + ac') & \varepsilon(\mu dc' + \mu cd' + ba' + ab') & \varepsilon\mu db' + \varepsilon\mu cc' + \varepsilon\mu bd' + aa' \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Из сравнения (6) и (8) непосредственно следует $\Delta(Z) \cdot \Delta(Z') = \Delta(Z'')$, т. е. отображение $\varphi(Z) = \Delta(Z)$, ставящее в соответствие каждому четырехмерному вектору Z элемент базового поля, является гомоморфизмом. Утверждение доказано.

Гомоморфизм конечных групп многомерных векторов

Предложения, аналогичные утверждениям 1, 2 и 3, можно доказать для значений размерности векторов $m \geq 5$. Авторы выполнили такое доказательство для $m = 5$, $m = 6$ и $m = 7$ в случае использования приведенной выше ТУБВ для определения операции умножения. Однако при достаточно больших m доказательство становится весьма громоздким. С целью проверить гипотезу о существовании указанного изоморфизма для произвольных значений размерности была разработана программа для ЭВМ, реализующая вычисление определителя, задающего гомоморфизм, и умножение векторов, определенное с помощью рассматриваемой ТУБВ. Вычислительный эксперимент подтвердил существование такого гомоморфизма для значений $m = 2, 3, \dots, 55$. Таким образом, рассматриваемый гомоморфизм представляется справедливым для произвольных значений размерности векторов. Формальное доказательство существования такого гомоморфизма в общем случае является актуальным, однако это составляет предмет самостоятельной математической задачи. Наличие данного гомоморфизма следует учитывать при разработке схем и алгоритмов ЭЦП на основе конечных групп векторов для того, чтобы устранить потенциальные атаки с его использованием.

Гомоморфизм и синтез схем ЭЦП на основе конечных групп векторов

Разработка алгоритмов ЭЦП, основанных на сложности дискретного логарифмирования в конечных группах, связана с использованием секретного ключа, представляющего собой некоторое число $x < q$, где q — достаточно большое простое число, являющееся порядком группы, и открытого ключа Y , вычисляемого путем возведения некоторого генератора группы G в степень x , т. е. по формуле $Y = G^x$. Применение такого способа генерации открытого ключа в случае синтеза схем ЭЦП на основе групп векторов будет допускать потенциальную атаку, связанную с использованием описанного выше гомоморфизма. Действительно, из условия $Y = G^x$ следует $y = g^{x'}$, где $y, g \in GF(p^s)$, $y = \Delta(Y)$ и $g = \Delta(G)$, т. е. задачу дискретного логарифмирования (ЗДЛ) в группе векторов можно связать с ЗДЛ в конечном поле $GF(p^s)$, над которым заданы векторы. Решая последнюю задачу, можно определить значение $x' \equiv x \pmod{q'}$, где q' — порядок элемента g в базовом поле $GF(p^s)$. В общем случае получим значение $x' \leq x$, однако определенная часть секретного ключа будет вычислена. Стойкая схема ЭЦП не

должна допускать такой возможности. Устранение таких атак может быть достигнуто путем выбора вектора G такого, что $\Delta(G) = 1$, как это было предложено в работе [6] в случае разработки схем ЭЦП на основе конечных групп невырожденных матриц. Действительно, тогда гомоморфизм дает уравнение $1 = 1^{x'}$, которое выполняется при любом значении неизвестной x' , т. е. из него нельзя получить какую-либо информацию о секретном ключе x .

Таким образом, в синтезе алгоритмов ЭЦП на основе групп векторов возникает вопрос о существовании векторов G порядка q таких, что $\Delta(G) = 1$. Ответ на этот вопрос в случае, когда для простого значения q выполняется условие $q > p^s - 1$, дает следующее утверждение, где рассматривается мультипликативная группа векторов, в которой умножение задано с использованием приведенной таблицы.

Утверждение 4. Пусть для некоторого вектора G , принадлежащего группе векторов над полем $GF(p^s)$, для которой имеет место установленный выше гомоморфизм, выполняется условие $q > p^s - 1$, где q — простой порядок вектора G . Тогда имеет место соотношение $\Delta(G) = 1$.

Доказательство: По условию, q — порядок вектора G , т. е. выполняется соотношение $G^q = E$, следовательно, в силу установленного гомоморфизма выполняется и соотношение $\Delta^q(G) = \Delta(E) = 1$. Последнее возможно только в двух случаях: либо $\Delta(G) = 1$, либо q — порядок некоторого отличного от нуля и единицы элемента поля $GF(p^s)$. Допустим, что имеет место второй случай, но тогда $q | p^s - 1$, поскольку порядок элемента поля делит порядок мультипликативной группы поля. Это противоречит условию утверждения $q > p^s - 1$. Таким образом, всегда имеет место первый случай. Утверждение доказано.

Утверждение 4 используется при построении схемы ЭЦП, основанной на векторных группах, заданных над простым полем $GF(p)$ и обладающих многомерной циклическостью своего строения.

Алгоритм ЭЦП на основе конечных групп векторов с многомерной циклическостью

Рассмотрим случай задания ВКК над простым полем $GF(p)$ с характеристикой, удовлетворяющей условию $m | p - 1$. Мультипликативная группа таких ВКК имеет r -мерное циклическое строение, где $r | m$ [3]. Ее минимальная система образующих включает r векторов, имеющих одинаковое значение порядка, а любой обратимый вектор Y может быть представлен как произведение некоторых степеней элементов, входящих в рассматриваемую систему образующих. Пусть q — мак-

симальный простой делитель порядка группы, тогда она содержит подгруппу порядка q^r , обладающую r -мерным циклическим строением и содержащую кроме единичного вектора только векторы порядка q . Минимальная система порождающих этой подгруппы содержит r векторов порядка q , которые обозначим как G_1, G_2, \dots, G_r . Открытый ключ предлагается генерировать в виде r векторов Y_1, Y_2, \dots, Y_r по формуле

$$Y_i = G_1^{x_{i1}} \circ G_2^{x_{i2}} \circ \dots \circ G_r^{x_{ir}}, \quad (9)$$

где $i = 1, 2, \dots, r$; $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ir}$ — набор чисел, выбираемых по случайному закону и составляющих секретный ключ. Ниже описаны процедуры формирования и проверки подлинности подписи в схеме ЭЦП, построенной с использованием открытого ключа со структурой (9). Заметим, что мы предполагаем, что значение r лежит в пределах $1 < r < m$, т. е. $m = \delta r$ при некоторых целых $\delta < m$ и $r < m$. В этом случае при коэффициентах растяжения $\mu = 1$ и ε таком, что уравнение $x^\gamma = \varepsilon$ относительно неизвестной x не имеет решений в поле $GF(p)$ для всех отличных от единицы делителей $\gamma | \delta$, порядок мультипликативной группы ВКК выражается формулой

$$\Omega = (p^\delta - 1)^r,$$

причем максимальное значение порядка векторов

$$\omega_{\max} = p^\delta - 1 = (p-1)(p^{\delta-1} + p^{\delta-2} + \dots + p + 1).$$

Для простого δ легко подобрать такие значения p , для которых число $q = \delta^{-1}(p^{\delta-1} + p^{\delta-2} + \dots + p + 1)$ является простым и $\omega_{\max} = \delta(p-1)q$, где разрядность простого множителя q примерно в $\delta-1$ раз превышает разрядность простого числа p , т. е. имеет место $q \gg p-1$ и для векторов G_i порядка q имеет место $\Delta(G_i) = 1$ (см. утверждение 4). Для синтеза алгоритмов ЭЦП представляет интерес использовать значения $\delta \in \{3, 5, 7, 11\}$ и $r \in \{2, 3, 4\}$, т. е. $6 \leq m \leq 44$. Рассмотрим вариант реализации схемы ЭЦП, заданной процедурами генерации и верификации ЭЦП.

Генерация подписи к сообщению M выполняется следующим образом.

1. Выбрать r случайных чисел k_1, k_2, \dots, k_r таких, что для всех $i = 1, 2, \dots, r$ выполняется соотношение $k_i < q$.

2. Вычислить вектор $R = G_1^{k_1} \circ G_2^{k_2} \circ \dots \circ G_r^{k_r}$.

3. Используя некоторую специфицированную хэш-функцию F_h (различные варианты хэш-функций представлены в работе [7]), вычислить значение хэш-функции h от сообщения M , к которому присоединен вектор R : $h = F_h(M, R)$, где длина $|h| \geq 160$ бит.

4. Представить h в виде конкатенации r значений h_1, h_2, \dots, h_r , т. е. $h = h_1 \| h_2 \| \dots \| h_r$, и вычислить

второй элемент ЭЦП в виде набора r чисел s_1, s_2, \dots, s_r :

$$s_i = k_i + \sum_{j=1}^r x_{ij} h_j \pmod q, \quad i = 1, 2, \dots, r,$$

где условие $\sum_{i=1}^r |s_i| = r |q| \geq 160$ бит должно быть обеспечено выбором соответствующих параметров используемой группы векторов ($|s_i|$ обозначает длину двоичной записи числа s_i).

Проверка подлинности ЭЦП выполняется так.

1. Вычислить вектор

$$R^* = Y_1^{-h_1} \circ Y_2^{-h_2} \circ \dots \circ Y_r^{-h_r} \circ G_1^{s_1} \circ G_2^{s_2} \circ \dots \circ G_r^{s_r}.$$

2. Вычислить величину $h^* = F_h(M, R^*)$.

3. Сравнить значения h^* и h . Если $h^* = h$, то ЭЦП является подлинной.

Пример построения групп векторов для использования в рассмотренной выше схеме ЭЦП. Зададим значения $m = 6$ и $p = 3112656501667$ (векторы определяются над простым конечным полем). Определим операцию умножения шестимерных векторов $ae + bi + cj + dk + hu + lv$ с помощью рассматриваемой ТУБВ при коэффициентах растяжения $\varepsilon = 4$ и $\mu = 1$. Значение 4 является квадратичным вычетом и кубичным невычетом по модулю 3112656501667, что задает формирование векторной группы с двухмерной циклическостью и $\Omega = (p^3 - 1)^r$, где $r = 2$. Максимальный простой делитель порядка группы равен $q = 3229543499124319810093519$. Данная группа шестимерных векторов содержит подгруппу Γ' порядка $\Omega' = q^2$, которая включает большое число подгрупп простого порядка, причем подгруппа Γ' не содержит подгрупп другого порядка, за исключением примитивной подгруппы, состоящей из одного единичного вектора. Все элементы подгруппы порядка $\Omega' = q^2$ генерируются как произведения всех возможных степеней некоторой пары векторов, составляющих систему образующих этой подгруппы. Например, рассматриваемая подгруппа Γ' генерируется следующей парой векторов:

$$G_1 = (2163836008099, 1269457016022, 1433319355034, 23538694425121, 674881435043, 911951500111)$$

и

$$G_2 = (2922266211036, 1381741886391, 1635981994737, 2434985478441, 1797895338418, 23924296834).$$

Проверка показала, что, действительно, в соответствии с утверждением 4 выполняются условия $\Delta(G_1) = 1$ и $\Delta(G_2) = 1$.

Заключение

Установленное гомоморфное отображение конечных групп векторов, заданных над конечным полем, в это поле доказано формально для значений размерности $m = 2, 3$ и 4 . Аналогичным способом этот гомоморфизм доказывается для других сравнительно малых значений m . Для больших значений размерности справедливость установлена экспериментально путем выполнения соответствующих вычислительных экспериментов. Наличие такого гомоморфизма требуется учитывать при синтезе схем ЭЦП на основе конечных групп векторов. Предложен алгоритм ЭЦП на основе конечных групп векторов, строение которых обладает многомерной циклическостью. Реализация алгоритмов ЭЦП по данной схеме даст достаточно высокую производительность (в 5–30 раз более высокую по сравнению с известными алгоритмами ЭЦП). Однако данный тип конечных групп является новым криптографическим примитивом, и сложная задача нахождения дискретных логарифмов по многомерному основанию, положенная в основу пред-

лагаемой схемы ЭЦП, требует детального самостоятельного изучения исследователями, специализирующимися в различных областях математики, криптографии и теории сложности. Такие исследования дадут в будущем этой схеме более полную и всестороннюю оценку, которая подтвердит ожидания авторов или потребует увеличения размеров параметров базовой конечной группы векторов для построения алгоритмов ЭЦП по предложенной схеме.

Для задания коммутативного и ассоциативного умножения векторов в конечном векторном пространстве могут быть использованы и другие варианты ТУБВ. Можно предположить, что установленный гомоморфизм будет иметь место для всех таких ТУБВ. Выполненные авторами частные проверки этой гипотезы подтвердили ее, но общее формальное доказательство наличия такого гомоморфизма для всех типов коммутативных и ассоциативных ТУБВ остается нерешенной проблемой, требующей самостоятельного исследования.

Работа поддержана грантом РФФИ № 08-07-00096-а.

Литература

1. Доронин С. Е., Молдовян Н. А., Синев В. С. Конечные расширенные поля для алгоритмов электронной цифровой подписи // Информационно-управляющие системы. 2009. № 1. С. 33–40.
2. Гурьянов Д. Ю., Дернова Е. С., Избаш В. И., Молдовян Д. Н. Алгоритмы электронной цифровой подписи на основе сложности извлечения корней в конечных группах известного порядка // Информационно-управляющие системы. 2008. № 5. С. 33–40.
3. Молдовян Н. А. Многомерная циклическость групп векторов и их использование в алгоритмах аутентификации информации // Вестник СПбГУ. Сер. 10. 2009. В печати.
4. Молдовяну П. А., Дернова Е. С., Молдовян Д. Н. Синтез конечных расширенных полей для криптографических применений // Вопросы защиты информации. 2008. № 3(82). С. 2–7.
5. Молдовян Д. Н., Молдовяну П. А. Задание умножения в полях векторов большой размерности // Вопросы защиты информации. 2008. № 3(82). С. 12–17.
6. Дернова Е. С., Костина А. А., Молдовяну П. А. Конечные группы матриц как примитив алгоритмов цифровой подписи // Вопросы защиты информации. 2008. № 3(82). С. 8–12.
7. Menezes A. J., Van Oorschot P. C., Vanstone S. A. Handbook of Applied Cryptography. — Boca Raton, FL: CRC Press, 1997. — 780 p.

УДК 621.39

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ КОГЕРЕНТНОГО ПРИЕМА СИГНАЛОВ ДВОИЧНОЙ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ПРИ НЕИДЕАЛЬНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ (Часть 2)¹

Н. В. Савищенко,

доктор техн. наук, профессор
Военная академия связи

Предлагается методика оценки потерь в мощности и помехоустойчивости когерентного приема сигналов при наличии ошибки в определении фазы несущей. Приведены основные соотношения для расчета помехоустойчивости когерентного приема двоичных сигналов амплитудно-фазовой модуляции с произвольным расположением сигнальных точек на плоскости, неравными энергиями и неравновероятной априорной вероятностью передачи сигналов при наличии ошибки сопровождения фазы.

Ключевые слова — помехоустойчивость, когерентный прием, неидеальная синхронизация, сигналы амплитудно-фазовой модуляции.

Анализ вероятности ошибки когерентного приема сигналов двоичной фазовой модуляции ФМ-2 (BPSK)

Символьная и битовая вероятности ошибок при фиксированной фазовой ошибке определяются выражением [1, 2]

$$P_{b/e}(h_{bc}^2, \varphi) = Q(\cos \varphi \sqrt{2h_{bc}^2}), \quad \varphi \in [-\pi, \pi]. \quad (5)$$

Сложность получения аналитических соотношений при усреднении вероятности ошибки по фазовой ошибке связана как с тем, что функция Гаусса не выражается через элементарные функции, так и с тем, что знаки аргумента функции Гаусса на интервале $[-\pi, \pi]$ могут изменяться на противоположные. Так, $\cos \varphi \geq 0$ при $\varphi \in [-\pi/2, \pi/2]$ и $\cos \varphi \leq 0$ при $\varphi \in [-\pi, -\pi/2] \cup [\pi/2, \pi]$. Для решения данной проблемы можно использовать три следующих подхода:

- 1) применяются численные методы вычисления интеграла, например с использованием встроенных в MathCad средств интегрирования;
- 2) интервал интегрирования разбивается на подынтервалы, на которых аргумент функции имеет постоянный знак, и каждый интервал рассматривается отдельно;

3) аргумент функции полагается положительным, т. е. берется модуль аргумента. Этот подход требует соответствующей численной проверки и в данной статье применялся только для сигналов ФМ-2.

Канал связи без замираний и с фазовой ошибкой. Рассмотрим канал связи без замираний, тогда

$$P_{b/e}(h_{bc}^2, \rho) = \int_{-\pi}^{\pi} Q(\cos \varphi \sqrt{2h_{bc}^2}) \omega(\varphi) d\varphi, \quad (6)$$

где $\omega(\varphi)$ — распределение Тихонова.

Учитывая четность подынтегральной функции, это выражение можно переписать в виде

$$P_{b/e}(h_{bc}^2, \rho) = G_{BPSK}(\rho) + 2 \int_0^{\pi/2} [-\omega(\varphi + \frac{\pi}{2}) Q(\sin \varphi \sqrt{2h_{bc}^2}) + \omega(\varphi) Q(\cos \varphi \sqrt{2h_{bc}^2})] d\varphi, \quad (7a)$$

где

$$G_{BPSK}(\rho) = 1 - 2 \int_0^{\pi/2} \omega(\varphi) d\varphi,$$

$$G_{BPSK}(\rho) = 2 \int_0^{\pi/2} \omega(\varphi + \frac{\pi}{2}) d\varphi =$$

$$= \frac{1}{\pi I_0(\rho)} \int_0^{\pi/2} \exp(-\rho \sin \varphi) d\varphi = \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k I_{2k+1}(\rho)}{2k+1 I_0(\rho)}.$$

¹ Окончание. Начало в № 3.

При $\rho \gg 1$ можно использовать приближенную формулу

$$G_{BPSK}(\rho) \cong \frac{1}{\pi I_0(\rho)} \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{2}\pi\rho\right) \right).$$

Относительная, вместо точной, погрешность при использовании этой формулы составляет $\delta = 10^{-2}$ при $\rho = 10$ дБ и $\delta = 10^{-4}$ при $\rho = 20$ дБ, при больших значениях ρ величина δ уменьшается дальше.

Таким образом, для распределения Тихонова формула вероятности ошибки при когерентном приеме ФМ-2 может быть представлена в виде

$$P_{b/e}(h_{bc}^2, \rho) = G_{BPSK}(\rho) + \frac{1}{\pi I_0(\rho)} \int_0^{\pi/2} \left[Q\left(\cos\varphi\sqrt{2h_{bc}^2}\right) \exp(\rho\cos\varphi) - Q\left(\sin\varphi\sqrt{2h_{bc}^2}\right) \exp(-\rho\sin\varphi) \right] d\varphi. \quad (76)$$

Рассмотрим предельный случай, используя (7а). При $\rho \rightarrow \infty$ $\omega(\varphi - \varphi_0) = \delta(\varphi - \varphi_0)$, поэтому $\lim_{\rho \rightarrow \infty} G_{BPSK}(\rho) = 0$, так как $\varphi_{0,1} = 0$, $\varphi_{0,2} = -\pi/2$ и

$$\int_a^b f(x)\delta(x-x_0)dx = \begin{cases} 0, & x_0 < a \vee x_0 > b, \\ 1/2f(x_0), & x_0 = a \vee x_0 = b, \\ f(x_0), & a < x_0 < b. \end{cases}$$

Следовательно, в канале связи без фазовой ошибки получаем известную формулу для вероятности ошибки когерентного приема ФМ-2 [1, 2]

$$P_{b/e}(h_{bc}^2) = \lim_{\rho \rightarrow \infty} P_{b/e}(h_{bc}^2, \rho) = Q\left(\sqrt{2h_{bc}^2}\right).$$

Если $\rho = 0$, то при любом отношении сигнал/шум h_{bc}^2 справедливо $P_{b/e}(h_{bc}^2, 0) = G_{BPSK}(0) = 0,5$.

При $h_{bc}^2 \rightarrow 0$ и произвольных значениях ρ

$$P_{b/e}(0, \rho) = \int_0^{\pi/2} \left(\omega(\varphi) + \omega\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \right) d\varphi = \frac{1}{2}.$$

Если использовать третий подход, то вероятность ошибки будет определяться выражением

$$P_{b/e}^*(h_{bc}^2, \rho) = \frac{1}{\pi I_0(\rho)} \int_0^{\pi} Q\left(\left|\cos\varphi\right|\sqrt{2h_{bc}^2}\right) \exp(\rho\cos\varphi) d\varphi. \quad (8)$$

Абсолютная погрешность от этого приближения может быть определена как

$$\varepsilon(h_{bc}^2, \rho) = P_{b/e}(h_{bc}^2, \rho) - P_{b/e}^*(h_{bc}^2, \rho) = 2 \int_0^{\pi/2} \operatorname{erf}\left(\sin\varphi\sqrt{h_{bc}^2}\right) \frac{\exp(-\rho\sin\varphi)}{2\pi I_0(\rho)} d\varphi,$$

где $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$ — интеграл вероятностей: $\operatorname{erf}(x) = 1 - Q(\sqrt{2}x)$. Относительная погрешность определяется выражением

$$\delta(h_{bc}^2, \rho) = \frac{P_{b/e}(h_{bc}^2, \rho) - P_{b/e}^*(h_{bc}^2, \rho)}{P_{b/e}(h_{bc}^2, \rho)}.$$

Несложно видеть, что, так как $|\operatorname{erf}(x)| \leq 1$, то

$$\varepsilon(h_{bc}^2, \rho) \leq \lim_{h_{bc}^2 \rightarrow \infty} \varepsilon(h_{bc}^2, \rho) = \varepsilon^*(\rho),$$

где

$$\varepsilon^*(\rho) = G_{BPSK}(\rho) = 2 \int_0^{\pi/2} \frac{\exp(-\rho\sin\varphi)}{2\pi I_0(\rho)} d\varphi.$$

Следует заметить, что принципиальное отличие между (6) и (8) заключается в том, что при использовании первой формулы существует предел вероятности ошибки, который не может быть улучшен. А именно, так как $G_{BPSK}(\rho) = \lim_{h_{bc}^2 \rightarrow \infty} P_{b/e}(h_{bc}^2, \rho)$, то $P_{b/e}(h_{bc}^2, \rho) \geq G_{BPSK}(\rho)$ для

любых отношений сигнал/шум h_{bc}^2 . В частности, $G_{BPSK}(0) = 0,5$, $G_{BPSK}(10) = 1,14321 \cdot 10^{-5}$, $G_{BPSK}(16) = 2,235743 \cdot 10^{-8}$, $G_{BPSK}(32) = 1,780924 \times 10^{-15}$ и в общем случае $\lim_{\rho \rightarrow \infty} G_{BPSK}(\rho) = 0$. В то же

время, применяя (8), получаем $\lim_{h_{bc}^2 \rightarrow \infty} P_{b/e}^*(h_{bc}^2, \rho) = 0$ для любых ρ .

В результате громоздких, но несложных преобразований, используя представление функции Лапласа через функцию Оуэна [6] и интегральное представление функции Бесселя [7, 8], формулу (8) можно представить в виде ряда

$$P_{b/e}^*(h_{bc}^2, \rho) = Q\left(\sqrt{2h_{bc}^2}\right) + \frac{\sqrt{\pi}}{4\pi^2 I_0(\rho)} \exp(-h_{bc}^2) \times \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m!} \Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{I_m(\rho)}{\rho^m} (2h_{bc}^2)^m \times \sum_{k=0}^{m-1} C_{m-1}^k \left(\frac{1}{h_{bc}^2}\right)^{k+\frac{1}{2}} \Gamma\left(k + \frac{1}{2}\right), \quad (9a)$$

где $\Gamma(x)$ — гамма-функция:

$$\Gamma\left(k + \frac{1}{2}\right) = \frac{\sqrt{\pi}}{2^k} (2k-1)!!, \quad C_{m-1}^k = \frac{(m-1)!}{k!(m-k-1)!},$$

$$(2k-1)!! = 1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2k-1).$$

Следовательно, выражение (9а) можно переписать в виде

$$P_{b/e}^*(h_{bc}^2, \rho) = Q\left(\sqrt{2h_{bc}^2}\right) + \frac{1}{4\pi^2 I_0(\rho)} \exp(-h_{bc}^2) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(2m-1)!!}{m!} \frac{I_m(\rho)}{\rho^m} \times \sum_{k=0}^{m-1} C_{m-1}^k \Gamma\left(k + \frac{1}{2}\right) (h_{bc}^2)^{m-k} \frac{1}{2}. \quad (9б)$$

Если в формулах (9) ограничиться только первым членом ряда, то при малых значениях h_{bc}^2

$$P_{b/e}^*(h_{bc}^2, \rho) \cong Q\left(\sqrt{2h_{bc}^2}\right) + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \frac{I_1(\rho)}{\rho I_0(\rho)} \sqrt{h_{bc}^2} \exp(-h_{bc}^2).$$

Если $\rho \gg 1$ (фактически при $\rho \geq 10$), то $I_1(\rho) \cong I_0(\rho)$, и тогда приближенная формула не будет содержать специальных функций:

$$P_{b/e}^*(h_{bc}^2, \rho) \cong Q\left(\sqrt{2h_{bc}^2}\right) + \frac{1}{4\rho\sqrt{\pi}} \sqrt{h_{bc}^2} \exp(-h_{bc}^2).$$

Для вычисления по (6) можно использовать соотношения (9), учитывая погрешность $\varepsilon(h_{bc}^2, \rho)$. В частности, последняя формула может быть представлена в виде

$$P_{b/e}(h_{bc}^2, \rho) \cong Q\left(\sqrt{2h_{bc}^2}\right) + \frac{1}{4\rho\sqrt{\pi}} \sqrt{h_{bc}^2} \exp(-h_{bc}^2) + \varepsilon(h_{bc}^2, \rho).$$

■ Таблица 1. Относительная погрешность $\delta(h_{bc}^2, \rho)$

ρ	h_{bc}^2 , дБ				
	0	3	6	10	12
10	1,422E-5	5,898E-5	5,24E-4	0,022	0,075
16	1,836E-8	2,214E-9	9,148E-7	2,251E-4	4,042E-3
32	7,651E-16	3,6E-15	4,559E-14	3,091E-11	9,772E-9
100	4,197E-46	2,029E-45	2,73E-44	2,427E-41	1,42E-38

Относительная погрешность $\delta(h_{bc}^2, \rho)$ от использования вместо (6) формулы (8) представлена в табл. 1.

Отношение сигнал/шум h_{bc}^2 в канале связи (табл. 2) необходимо для расчетов энергетического проигрыша, результаты которых показывают, например, что если ошибки находятся в интервале от 10^{-3} до 10^{-9} , то при $\rho = 20$ дБ (СКО $\sigma_\varphi = 0,106$ рад или $6,056^\circ$) энергетический проигрыш составляет величину всего лишь порядка 0,05 дБ, при $\rho \cong 15$ дБ (СКО $\sigma_\varphi = 0,178$ рад или $10,21^\circ$) — порядка 0,2–0,5 дБ, в то же время при $\rho = 10$ дБ (СКО $\sigma_\varphi = 0,325$ рад или $18,624^\circ$) энергетический проигрыш изменяется приблизительно от 1 дБ (при $P_b^* = 10^{-3}$) до 2 дБ (при $P_b^* = 10^{-4}$). При малых значениях вероятности ошибки $P_b^* \leq 10^{-5}$ и $\rho = 10$ дБ ни при каких значениях отношения сигнал/шум эти величины не достигаются. Таким образом, при $\rho \leq 12$ дБ (СКО $\sigma_\varphi = 0,254$ рад или $14,563^\circ$) происходит существенное ухудшение помехоустойчивости приема, особенно заметное при малых значениях вероятности ошибки.

Канал связи с замираниями и с фазовой ошибкой. Для канала связи с общими замираниями в соотношении (6) могут быть использованы либо (7), либо бесконечный ряд (9). Усреднение функции Гаусса можно осуществить, используя \mathcal{N} -функцию или \mathcal{S} -функцию, но в случае применения бесконечного ряда (9) появляются еще

■ Таблица 2. Необходимое отношение сигнал/шум h_{bc}^2 в канале связи

ρ	P_b^*						
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
$\rho \rightarrow \infty$ ($\Delta\varphi = 0$)	6,789523	8,398262	9,587858	10,529832	11,308660	11,972055	12,54955
$\rho = 100^*$ (20 дБ)	6,835405	8,445249	9,636046	10,579320	11,359560	12,024487	12,603653
$\rho = 32^{**}$ ($\cong 15$ дБ)	6,953410	8,578710	9,790483	10,763611	11,589227	12,329207	13,045206
$\rho = 16^{**}$ ($\cong 12$ дБ)	7,210879	8,966462	10,489217	12,402847	16,341827	—	—
$\rho = 10$ (10 дБ)	7,812869	10,802819	—	—	—	—	—

Примечания: Знаком «—» отмечены те поля, в которых не существует значений h_{bc}^2 , при которых могут быть достигнуты требуемые вероятности ошибок.

* Расчеты проведены по формуле (5) при $\varphi = 0$ (без фазовой ошибки).

** Расчеты проведены по формулам (6), (7) с фазовой ошибкой, распределенной по закону Тихонова.

и гипергеометрические функции, поэтому такой подход не рационален. Его преимущество состоит лишь в том, что можно проанализировать формулу для вероятности ошибки, сравнив ее с формулой, полученной для идеального когерентного приема, и оценить полученную погрешность аналитически.

Для усреднения соотношения (6) перепишем его в виде

$$P_{b/e}(h_{bc}^2, \rho) = \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi Q(\cos \varphi \sqrt{\alpha^2 \mu^2}) \omega(\varphi) d\varphi \omega(\mu) d\mu, \quad (10a)$$

где $\alpha^2 = \frac{2h_{bc}^2}{m_2}$; $\omega(\varphi)$ — плотность распределения

Тихонова, $\omega(\varphi) = \omega(-\varphi)$. Используя (7а) и \mathcal{H} -функцию для замираний Райса—Накагами, получаем, что в канале с замираниями и фазовой ошибкой вероятность ошибки

$$P_{b/e}(h_{bc}^2, \rho) = G_{BPSK}(\rho) + 4 \int_0^{\pi/2} \left[\omega(\varphi) \mathcal{H}_p(z_c[h_{bc}^2, \varphi], b_c[h_{bc}^2, \varphi], +\infty) - \omega\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \mathcal{H}_p(z_s[h_{bc}^2, \varphi], b_s[h_{bc}^2, \varphi], +\infty) \right] d\varphi, \quad (10b)$$

где

$$z_{s,c}[h_{bc}^2, \varphi] = \frac{\gamma}{\sqrt{\beta}} b_{s,c}[h_{bc}^2, \varphi];$$

$$b_c[h_{bc}^2, \varphi] = \sqrt{\frac{2h_{bc}^2 \cos^2 \varphi}{2h_{bc}^2 \cos^2 \varphi + m_2 \beta}};$$

$$b_s[h_{bc}^2, \varphi] = \sqrt{\frac{2h_{bc}^2 \sin^2 \varphi}{2h_{bc}^2 \sin^2 \varphi + m_2 \beta}}.$$

В частности, для релейских замираний ($\rho = 1$)

$$z_{s,c}[h_{bc}^2, \varphi] = 0;$$

$$b_s[h_{bc}^2, \varphi] = \sqrt{\frac{h_{bc}^2 \sin^2 \varphi}{1 + h_{bc}^2 \sin^2 \varphi}};$$

$$b_c[h_{bc}^2, \varphi] = \sqrt{\frac{h_{bc}^2 \cos^2 \varphi}{1 + h_{bc}^2 \cos^2 \varphi}},$$

для райсовских замираний ($\rho = 1$)

$$z_{s,c}[h_{bc}^2, \varphi] = \sqrt{2\gamma_0^2} b_{s,c}[h_{bc}^2, \varphi];$$

$$b_s[h_{bc}^2, \varphi] = \sqrt{\frac{h_{bc}^2 \sin^2 \varphi}{1 + \gamma_0^2 + h_{bc}^2 \sin^2 \varphi}};$$

$$b_c[h_{bc}^2, \varphi] = \sqrt{\frac{h_{bc}^2 \cos^2 \varphi}{1 + \gamma_0^2 + h_{bc}^2 \cos^2 \varphi}},$$

где $\gamma_0^2 = \mu_0^2 / 2\sigma^2$ — глубина замираний. Рассмотрим предельный случай и получим формулу для вероятности ошибки при отсутствии фазовой ошибки ($\rho \rightarrow \infty$) и замираниях Райса—Накагами. Очевидно, что $\omega(\varphi - \varphi_0) = \delta(\varphi - \varphi_0)$, $\lim_{\rho \rightarrow \infty} G_{BPSK}(\rho) = 0$,

и так как $\varphi_{0,1} = 0$, $\varphi_{0,2} = -\pi/2$, то

$$P_{b/e}(h_{bc}^2) = \lim_{\rho \rightarrow \infty} P_{b/e}(h_{bc}^2, \rho) = 2 \mathcal{H}_p \left(\frac{\gamma}{\sqrt{\beta}} \sqrt{\frac{2h_{bc}^2}{2h_{bc}^2 + m_2 \beta}}, \sqrt{\frac{2h_{bc}^2}{2h_{bc}^2 + m_2 \beta}}, +\infty \right).$$

В частности, для релейских замираний

$$\mathcal{H}(0, b, +\infty) = \frac{1-b}{4} \quad [6], \text{ следовательно, после про-}$$

стейших преобразований получаем, что

$$P_{b/e}(h_{bc}^2, \rho) = \frac{1}{2} + \int_0^{\pi/2} \times \left[\omega\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \sqrt{\frac{h_{bc}^2 \sin^2 \varphi}{1 + h_{bc}^2 \sin^2 \varphi}} - \omega(\varphi) \sqrt{\frac{h_{bc}^2 \cos^2 \varphi}{1 + h_{bc}^2 \cos^2 \varphi}} \right] d\varphi.$$

При отсутствии фазовой ошибки ($\rho \rightarrow \infty$, $\omega(\varphi) = \delta(\varphi)$) получаем известную формулу вероятности ошибки в канале с релейскими замираниями [1, 2]

$$P_{b/e}(h_{bc}^2) = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{h_{bc}^2}{1 + h_{bc}^2}} \right) = \frac{1}{2} \frac{1}{1 + h_{bc}^2 + \sqrt{h_{bc}^2 + h_{bc}^4}}.$$

Соответствующее выражение для вероятности ошибки может быть легко получено и для четырехпараметрических замираний, если воспользоваться определением \mathcal{S} -функции.

Анализ вероятности ошибки когерентного приема сигналов АФМ-2

Обобщим предыдущий материал по нескольким пунктам: энергии сигналов, угол между ними произвольный (т. е. рассматриваем произвольное расположение двух с разной энергией сигналов в двумерном пространстве) и вероятности их передачи также произвольны.

Пусть передачи информации используются два сигнала в общем случае с различной энергией: $s_0(t) = \sqrt{E_0} \psi_0(t)$, $s_1(t) = \sqrt{E_1} \psi_1(t)$, где $\psi_0(t)$,

$\psi_1(t)$ — нормированные функции, $\|\psi_0(t)\| = \|\psi_1(t)\| = 1$, с произвольным углом между ними, т. е. коэффициент неортогональности $\gamma = \cos\varphi_{01} = (\psi_0(t), \psi_1(t))$. Предположим, что сигнал $s_0(t)$ передается с вероятностью p , а сигнал $s_1(t)$ — с вероятностью $(1-p)$. Без ограничения общности можно считать, что $p \in [0, 1/2]$. Расстояние между двумя сигналами может быть определено по формуле

$$d = \sqrt{E_{01}} = \sqrt{E_0 + E_1 - 2\gamma E_0 E_1}.$$

В этой системе сигналов максимальная энергия $E_m = \max(E_0, E_1)$, средняя энергия $E_c = pE_0 + (1-p)E_1$, а квадрат пик-фактора сигнала

$$\Pi^2 = \frac{\max(E_0, E_1)}{p(E_0 - E_1) + E_1}.$$

Пусть $E_0 \neq 0$, и введем коэффициент пропорциональности энергий $\chi^2 = E_1/E_0$, тогда $E_1 = \chi^2 E_0$. Следовательно:

$$h_{bm}^2 = \max(1, \chi^2)h_0^2, \quad h_{bc}^2 = (p + (1-p)\chi^2)h_0^2,$$

где $h_0^2 = E_0/N_0$. Соответственно, квадрат пик-фактора

$$\Pi^2(\chi) = \frac{\max(1, \chi^2)}{p + (1-p)\chi^2}.$$

Если $E_0 = 0$, то $E_m = E_1$, $E_c = (1-p)E_1$ и, следовательно, $h_{bc}^2 = (1-p)h_{bm}^2$ и квадрат пик-фактора $\Pi^2 = 1/(1-p) \in [1, 2]$.

При использовании критерия $\min P_e$ вероятность ошибки на символ при отсутствии фазовой ошибки определяется как [9, 10]

$$P_e = pQ\left(\frac{d-2\Delta}{\sqrt{2N_0}}\right) + (1-p)Q\left(\frac{d+2\Delta}{\sqrt{2N_0}}\right),$$

где $\Delta = \frac{N_0}{2d} \ln \frac{1-p}{p}$. Введем величину $h_{01}^2 = \frac{E_{01}}{2N_0}$,

тогда вероятность ошибки может быть представлена в виде

$$P_e(h_{01}^2, p) = pQ\left(\sqrt{h_{01}^2} - \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{h_{01}^2}}\right) + (1-p)Q\left(\sqrt{h_{01}^2} + \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{h_{01}^2}}\right),$$

где $\tilde{\Delta} = \frac{1}{2} \ln \frac{1-p}{p} \geq 0$. Если в канале связи обрыв, т. е. $h_{01}^2 \rightarrow 0$, тогда $\lim_{h_{01}^2 \rightarrow 0} P_e(h_{01}^2, p) = p \in [0, 1/2]$.

Пусть $h_1^2 = E_1/N_0$, тогда

$$h_{01}^2 = \frac{E_{01}}{2N_0} = \frac{1}{2}(h_0^2 + h_1^2) - \gamma h_0 h_1.$$

В работе [10] приведено решение задачи минимизации $P_e(h_{01}^2, p)$ как функции от величин E_0, E_1 при фиксированной средней энергии $E_c = pE_0 + (1-p)E_1$. Очевидно, что ограничение на переменные представляет собой эллипс: $ph_0^2 + (1-p)h_1^2 = E_c/N_0$. Приведем другой вариант решения данной задачи, основанный на методе множителей Лагранжа. Функция Лагранжа представляет собой выражение

$$L(h_0, h_1, \lambda) = pQ\left(\sqrt{h_{01}^2(h_0, h_1)} - \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{h_{01}^2(h_0, h_1)}}\right) + (1-p)Q\left(\sqrt{h_{01}^2(h_0, h_1)} + \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{h_{01}^2(h_0, h_1)}}\right) + \lambda(ph_0^2 + (1-p)h_1^2 - E_c/N_0).$$

Дифференцируя функцию Лагранжа по переменным h_0, h_1 и приравнявая производные нулю, получаем, что должно выполняться условие

$$ph_0(h_1 - \gamma h_0) = (1-p)h_1(h_0 - \gamma h_1).$$

Если $h_0 = 0$, то при $h_1 \neq 0$ должно выполняться условие $h_0 - \gamma h_1 = 0$ или $\gamma = 0$ (сигналы ортогональны). Тогда $E_0 = 0$, $E_1 = E_c/(1-p)$ и $E_{01} = E_c/(1-p)$. Если $p = 0,5$, то этому условию удовлетворяют и ортогональные сигналы ($\gamma = 0$) с равной энергией: $E_0 = E_1$, но при этом $E_{01} = E_c$. Аналогично при $h_1 = 0$ и $h_0 \neq 0$ должно выполняться условие $h_1 - \gamma h_0 = 0$ или $\gamma = 0$ (сигналы ортогональны). Соответственно, тогда $E_1 = 0$, $E_0 = E_c/p$ и $E_{01} = E_c/p$.

Если $h_0 \neq 0$ и $h_1 \neq 0$, то данное условие можно представить в виде квадратного уравнения

$$(1-p)\gamma\chi^2 - (1-2p)\chi - p = 0,$$

где $\chi^2 = E_1/E_0$. Решая квадратное уравнение, получаем, что дискриминант уравнения равен $(2p-1)^2 + 4p\gamma^2(1-p) = 1 - 4p(1-p)(1-\gamma^2)$ и положительные решения уравнения имеют вид

$$\chi_1 = -\frac{1}{2\gamma(1-p)} \left[(2p-1) + \sqrt{1-4p(1-p)(1-\gamma^2)} \right], \quad \gamma < 0$$

и

$$\chi_2 = \frac{1}{2\gamma(1-p)} \left[-(2p-1) + \sqrt{1-4p(1-p)(1-\gamma^2)} \right], \quad \gamma > 0.$$

Только при $\gamma < 0$ вероятность ошибки достигает минимума, т. е. $\chi_{opt} = \chi_1$. Следовательно,

$E_{1,opt} = \chi_{opt}^2 E_{0,opt}$, где $E_{0,opt} = \frac{E_c}{p + (1-p)\chi_{opt}^2}$.

В статье [10] приведены другие выражения для оптимальных значений энергий при $\gamma < 0$, что соответствует $\varphi_{01} \in [\pi/2, \pi]$:

$$E_{0,\text{opt}} = \frac{E_c}{2p} \left[1 + \frac{1-2p}{\sqrt{1-4p(1-p)(1-\gamma^2)}} \right];$$

$$E_{1,\text{opt}} = \frac{E_c}{2(1-p)} \left[1 - \frac{1-2p}{\sqrt{1-4p(1-p)(1-\gamma^2)}} \right].$$

Определим вероятность символьной (битовой) ошибки при наличии фазовой ошибки. Предположим, что $E_0, E_1 \neq 0$, тогда при сдвиге сигналов на угол φ «расстояния» (эти величины могут быть и отрицательными) до границы областей принятия решения будут определяться как

$$d_0 = \frac{d}{2} - \Delta + b_0; \quad d_1 = \frac{d}{2} + \Delta - b_1,$$

где

$$b_0 = 2 \sin \frac{\varphi}{2} \frac{E_0}{\sqrt{E_{01}}} \left(\sqrt{\frac{E_1}{E_0}} \sin \left(\varphi_{01} + \frac{\varphi}{2} \right) - \sin \frac{\varphi}{2} \right);$$

$$b_1 = 2 \sin \frac{\varphi}{2} \frac{E_1}{\sqrt{E_{01}}} \left(\sqrt{\frac{E_0}{E_1}} \sin \left(\varphi_{01} - \frac{\varphi}{2} \right) + \sin \frac{\varphi}{2} \right).$$

Тогда

$$P_e = pQ \left(\frac{d-2\Delta+2b_0}{\sqrt{2N_0}} \right) + (1-p)Q \left(\frac{d+2\Delta-2b_1}{\sqrt{2N_0}} \right).$$

После несложных преобразований формула для вероятности ошибки при неравновероятной передаче сигналов с различной энергией и фиксированной фазовой ошибкой может быть представлена в виде

$$P_e(h_{bc}^2, p, \varphi) = pQ \left[(1 + u(\chi, \gamma, \varphi)) \sqrt{2g(\chi, p, \gamma)h_{bc}^2} - \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{2g(\chi, p, \gamma)h_{bc}^2}} \right] + (1-p)Q \left[(1 - v(\chi, \gamma, \varphi)) \times \sqrt{2g(\chi, p, \gamma)h_{bc}^2} + \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{2g(\chi, p, \gamma)h_{bc}^2}} \right],$$

где $h_{01}^2 = 2g(\chi, p, \gamma)h_{bc}^2$ и

$$u(\chi, \gamma, \varphi) = 4 \sin \frac{\varphi}{2} \left(\chi \sin \left(\varphi_{01} + \frac{\varphi}{2} \right) - \sin \frac{\varphi}{2} \right) \frac{1}{1-2\gamma\chi + \chi^2};$$

$$v(\chi, \gamma, \varphi) = 4 \chi \sin \frac{\varphi}{2} \left(\sin \left(\varphi_{01} - \frac{\varphi}{2} \right) + \chi \sin \frac{\varphi}{2} \right) \frac{1}{1-2\gamma\chi + \chi^2};$$

$$g(\chi, p, \gamma) = \frac{1}{4} \frac{1-2\gamma\chi + \chi^2}{p + (1-p)\chi^2}.$$

При обрыве канала связи ($h_{bc}^2 \rightarrow 0$) и идеальном когерентном приеме получаем $\lim_{h_{bc}^2 \rightarrow 0} P_e \times$

$\times (h_{bc}^2, p, \varphi) = p$. Для усреднения вероятности ошибки при случайном характере фазовой ошибки вероятность ошибки определяется по (2). Аналитическое выражение получается в этом случае громоздким, поэтому ограничимся рассмотрением частных случаев.

А. Сигнал АМ-2 (ASK, OOK). Пусть $E_0 = 0$, $E_1 \neq 0$, тогда $b_0 = 0$ и $b_1 = 2 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \sqrt{E_1}$. Максимальная энергия $E_m = E_1$, средняя энергия $E_c = (1-p) \times E_1$, следовательно, $h_{bc}^2 = (1-p)h_{0m}^2$ и квадрат пикфактора $\Pi^2 = 1/(1-p) \in [1, 2]$.

Тогда при фиксированной фазовой ошибке вероятность ошибочного приема

$$P_e(h_{bc}^2, p, \varphi) = pQ \left(\left(\frac{h_{bc}^2}{2(1-p)} \right)^{1/2} - \tilde{\Delta} \left(\frac{h_{bc}^2}{2(1-p)} \right)^{-1/2} \right) + (1-p)Q \left((2 \cos \varphi - 1) \left(\frac{h_{bc}^2}{2(1-p)} \right)^{1/2} + \tilde{\Delta} \left(\frac{h_{bc}^2}{2(1-p)} \right)^{-1/2} \right).$$

Эта формула может быть формально получена из общей формулы, если учесть, что в этом случае $\chi^2 \rightarrow \infty$ и, соответственно:

$$\lim_{\chi \rightarrow \infty} u(\chi, p, \varphi) = 0;$$

$$\lim_{\chi \rightarrow \infty} v(\chi, p, \varphi) = 4 \sin^2(\varphi/2);$$

$$\lim_{\chi \rightarrow \infty} g(\chi, p, \rho) \triangleq g = \frac{1}{4(1-p)}.$$

Средняя вероятность ошибки принимает значения

$$P_e(h_{bc}^2, p, \rho) = pQ \left(\sqrt{2gh_{bc}^2} - \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{2gh_{bc}^2}} \right) + (1-p) \int_{-\pi}^{\pi} Q \left((2 \cos \varphi - 1) \sqrt{2gh_{bc}^2} + \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{2gh_{bc}^2}} \right) \omega(\varphi) d\varphi.$$

В результате, используя соотношение

$$\int_{-\pi}^{\pi} Q(a \cos \varphi + b) \omega(\varphi) d\varphi = 2 \int_0^{\pi/2} \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) d\varphi + \int_0^{\pi/2} Q(a \sin \varphi - b) \omega \times \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) d\varphi + \int_0^{\pi/2} Q(a \sin \varphi + b) \omega \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) d\varphi,$$

после несложных преобразований получаем

$$P_e(h_{bc}^2, p, \rho) = G_{OOK}(p, \rho) + pQ \left[\sqrt{2gh_{bc}^2} - \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{2gh_{bc}^2}} \right] +$$

$$+ 2(1-p) \int_0^{\pi/2} Q \left((2\sin\varphi + 1) \sqrt{2gh_{bc}^2} - \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{2gh_{bc}^2}} \right) \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) d\varphi +$$

$$+ \int_{\pi/6}^{\pi/2} Q \left((2\sin\varphi - 1) \sqrt{2gh_{bc}^2} + \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{2gh_{bc}^2}} \right) \omega \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) d\varphi -$$

$$- \int_0^{\pi/6} Q \left((1 - 2\sin\varphi) \sqrt{2gh_{bc}^2} - \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{2gh_{bc}^2}} \right) \omega \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) d\varphi,$$

где

$$G_{OOK}(p, \rho) = 2(1-p) \left[\int_0^{\pi/2} \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) d\varphi + \int_0^{\pi/6} \omega \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) d\varphi \right],$$

$$G_{OOK}(p, 0) = \frac{4}{3}(1-p).$$

Рассмотрим предельные случаи. Если $h_{bc}^2 \rightarrow \infty$, то $\lim_{h_{bc}^2 \rightarrow \infty} P_e(h_{bc}^2, p, \rho) = G_{OOK}(p, \rho)$. При $\rho \rightarrow \infty \omega \times (\varphi - \varphi_0) = \delta(\varphi - \varphi_0)$, поэтому

$$\lim_{\rho \rightarrow \infty} G_{OOK}(p, \rho) =$$

$$= 2(1-p) \left[\int_0^{\pi/2} \delta \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) d\varphi + \int_0^{\pi/6} \delta \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) d\varphi \right] = 0.$$

Отсюда следует, что

$$\lim_{\rho \rightarrow \infty} P_e(h_{bc}^2, p, \rho) =$$

$$= pQ \left[\sqrt{2gh_{bc}^2} - \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{2gh_{bc}^2}} \right] + (1-p)Q \left[\sqrt{2gh_{bc}^2} + \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{2gh_{bc}^2}} \right].$$

Это выражение совпадает с формулой, полученной для вероятности ошибки при идеальном когерентном приеме сигналов АФМ-2. При обрыве канала связи ($h_{bc}^2 \rightarrow 0$) и идеальном когерентном приеме $\lim_{\rho \rightarrow \infty} P_e(0, p, \rho) = p$.

Симметричный вариант получаем, если $E_0 \neq 0$, $E_1 = 0$, тогда максимальная энергия $E_m = E_2$, средняя энергия $E_c = pE_0$, следовательно, $h_{bc}^2 = ph_{bm}^2$ и квадрат пик-фактора $\Pi^2 = 1/p \in [2, \infty)$.

Поскольку $\chi^2 = 0$, то

$$\lim_{\chi \rightarrow \infty} u(\chi, \gamma, \varphi) = -4\sin^2(\varphi/2);$$

$$\lim_{\chi \rightarrow \infty} v(\chi, \gamma, \varphi) = 0;$$

$$\lim_{\chi \rightarrow \infty} g(\chi, p, \rho) \triangleq g = \frac{1}{4p}$$

и

$$P_e(h_{bc}^2, p, \varphi) = pQ \left[(2\cos\varphi - 1) \sqrt{2gh_{bc}^2} - \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{2gh_{bc}^2}} \right] +$$

$$+ (1-p)Q \left[\sqrt{2gh_{bc}^2} + \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{2gh_{bc}^2}} \right].$$

Если $p = 0,5$, то $\tilde{\Delta} = 0$, при $E_0 = 0$, $E_1 \neq 0$ вероятность ошибки при приеме сигналов АМ-2

$$P_e(h_{bc}^2, \rho) = G_{OOK}(\rho) + \frac{1}{2}Q \left(\sqrt{2gh_{bc}^2} \right) +$$

$$+ \left[\int_0^{\pi/2} Q \left((2\sin\varphi + 1) \sqrt{2gh_{bc}^2} \right) \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) d\varphi + \right.$$

$$+ \int_{\pi/6}^{\pi/2} Q \left((2\sin\varphi - 1) \sqrt{2gh_{bc}^2} \right) \omega \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) d\varphi -$$

$$\left. - \int_0^{\pi/6} Q \left((1 - 2\sin\varphi) \sqrt{2gh_{bc}^2} \right) \omega \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) d\varphi \right],$$

$$\text{где } G_{OOK}(\rho) = \int_0^{\pi/2} \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) d\varphi + \int_0^{\pi/6} \omega \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) d\varphi.$$

Б. Сигнал ФМ-2 (BPSK) с неравновероятной передачей. В этом случае $\chi^2 = 1$ и $\gamma = -1$, так как угол между сигналами $\varphi_{01} = \pi$. Тогда

$$u(\chi, \gamma, \varphi) = -2\sin^2 \frac{\varphi}{2};$$

$$v(\chi, \gamma, \varphi) = 2\sin^2 \frac{\varphi}{2};$$

$$g(\chi, p, \gamma) \triangleq g = 1.$$

Следовательно, при фиксированной фазовой ошибке вероятность ошибки

$$P_e(h_{bc}^2, p, \varphi) = pQ \left[\cos\varphi \sqrt{2h_{bc}^2} - \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{2h_{bc}^2}} \right] +$$

$$+ (1-p)Q \left[\cos\varphi \sqrt{2h_{bc}^2} + \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{2h_{bc}^2}} \right].$$

Средняя вероятность ошибки может быть получена усреднением по φ . В результате несложных преобразований получаем

$$P_e(h_{bc}^2, p, \rho) = G_{BPSK}(\rho) + 2 \int_0^{\pi/2} \times \\ \times \left[U(\varphi, p, \rho) Q \left[\sin \varphi \sqrt{2h_{bc}^2} + \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{2h_{bc}^2}} \right] + \right. \\ \left. + V(\varphi, p, \rho) Q \left[\sin \varphi \sqrt{2h_{bc}^2} - \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{2h_{bc}^2}} \right] \right] d\varphi,$$

где $G_{BPSK}(\rho)$ не зависит от априорной вероятности p и совпадает с величиной, полученной для ФМ-2 при $p = 0,5$, т. е.

$$G_{BPSK}(\rho) = 2 \int_0^{\pi/2} \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) d\varphi = 1 - 2 \int_0^{\pi/2} \omega(\varphi) d\varphi$$

и

$$U(\varphi, p, \rho) = (1-p)\omega \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) - p\omega \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right); \\ V(\varphi, p, \rho) = p\omega \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) - (1-p)\omega \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right).$$

При этом

$$U(\varphi, p, \rho) + V(\varphi, p, \rho) = \omega \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) - \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right);$$

$$U(\varphi, p, \rho) - V(\varphi, p, \rho) = (2p-1) \left[\omega \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) - \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right].$$

Если $p = 0,5$, то

$$U \left(\varphi, \frac{1}{2}, \rho \right) = V \left(\varphi, \frac{1}{2}, \rho \right) = \frac{1}{2} \left[\omega \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) - \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right],$$

$\tilde{\Delta} = 0$ и

$$P_e \left(h_{bc}^2, \frac{1}{2}, \rho \right) = G_{BPSK}(\rho) + \\ + 2 \int_0^{\pi/2} \left[\omega \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) - \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right] Q \left(\sin \varphi \sqrt{2h_{bc}^2} \right) d\varphi.$$

Это выражение отличается от (7), и на его основе можно получить другие соотношения, например в канале с общими замираниями. Если учесть, что

$$\omega \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) - \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) = \frac{1}{\pi I_0(\rho)} \text{sh}(\rho \sin \varphi),$$

то можно формулу для вероятности ошибки представить в виде

$$P_e \left(h_{bc}^2, \frac{1}{2}, \rho \right) = G_{BPSK}(\rho) + \\ + \frac{2}{\pi I_0(\rho)} \int_0^{\pi/2} \text{sh}(\rho \sin \varphi) Q \left(\sin \varphi \sqrt{2h_{bc}^2} \right) d\varphi.$$

В. Сигнал ЧМ-2 (FSK) с неравновероятной передачей. В этом случае $\chi^2 = 1$ и $\gamma = 0$, так как сигналы перпендикулярны ($\varphi_{01} = \pi/2$). Тогда

$$u(\chi, \gamma, \varphi) = 2 \sin(\varphi/2) [\cos(\varphi/2) - \sin(\varphi/2)] = \\ = \sin \varphi + \cos \varphi - 1;$$

$$v(\chi, \gamma, \varphi) = 2 \sin(\varphi/2) [\cos(\varphi/2) + \sin(\varphi/2)] = \\ = \sin \varphi - \cos \varphi + 1;$$

$$g(\chi, p, \rho) \triangleq g = 0,5.$$

Следовательно, при фиксированной фазовой ошибке вероятность ошибки

$$P_e(h_{bc}^2, p, \varphi) = p Q \left[\sin \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) \sqrt{2h_{bc}^2} - \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{h_{bc}^2}} \right] + \\ + (1-p) Q \left[\cos \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) \sqrt{2h_{bc}^2} + \frac{\tilde{\Delta}}{\sqrt{h_{bc}^2}} \right].$$

Средняя вероятность ошибки, а также частные случаи из этой формулы могут быть получены аналогично предыдущим выкладкам.

Если $p = 0,5$, то

$$P_e \left(h_{bc}^2, \frac{1}{2}, \varphi \right) = \\ = \frac{1}{2} \left[Q \left[\sin \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) \sqrt{2h_{bc}^2} \right] + Q \left[\cos \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) \sqrt{2h_{bc}^2} \right] \right].$$

В результате несложных преобразований получаем, что средняя вероятность ошибки

$$P_e(h_{bc}^2, \rho) = G_{FSK}^b(\rho) + \\ + \int_0^{\pi/4} \left[U(\varphi, \rho) Q \left(\sin \varphi \sqrt{2h_{bc}^2} \right) + V(\varphi, \rho) Q \left(\cos \varphi \sqrt{2h_{bc}^2} \right) \right] d\varphi,$$

где

$$G_{FSK}(\rho) = \int_0^{\pi/4} \left[\omega \left(\varphi - \frac{3\pi}{4} \right) + \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) + 2\omega \left(\varphi + \frac{3\pi}{4} \right) \right] d\varphi;$$

$$U(\varphi, \rho) = \omega \left(\varphi - \frac{3\pi}{4} \right) + \omega \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) - \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) - \omega \left(\varphi + \frac{3\pi}{4} \right);$$

$$V(\varphi, \rho) = -\omega \left(\varphi - \frac{3\pi}{4} \right) + \omega \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) + \omega \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) - \omega \left(\varphi + \frac{3\pi}{4} \right).$$

Таким образом, в данной статье показано, что зависимость вероятности ошибки от фазовой ошибки носит существенно нелинейный характер и, начиная с некоторого порогового значения, дальнейшее увеличение отношения сигнал/шум не приводит к повышению помехоустойчивости. Следовательно, имеется своеобразный эффект энергетического насыщения, после которого уже нецелесообразно дальнейшее повышение энергетики и необходимы другие методы борьбы с этим эффектом.

Приложение. Матрица преобразования координат. Определим условия ортогональности преобразования, заданного матрицей

$$\Psi(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \hat{\delta}_{21} \sin \varphi & \dots & \hat{\delta}_{N1} \sin \varphi \\ -\hat{\delta}_{21} \sin \varphi & \cos \varphi & \dots & \hat{\delta}_{N2} \sin \varphi \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\hat{\delta}_{N1} \sin \varphi & -\hat{\delta}_{N2} \sin \varphi & \dots & \cos \varphi \end{pmatrix}.$$

Очевидно, что при $\varphi = 0$ матрица преобразования совпадает с единичной матрицей: $\Psi(0) = E$. В дальнейшем предполагаем, что $\varphi \neq 0$. В общем случае матрица $\Psi(\varphi)$ представляет собой сумму диагональной матрицы $D = \cos \varphi E$ и кососимметрической матрицы $\Phi(\varphi) = \sin \varphi \Psi(\pi/2)$: $\Psi(\varphi) = D + \Phi(\varphi)$. Условие ортогональности преобразования означает, что должно выполняться тождество $\Psi(\varphi)\Psi^T(\varphi) = \Psi^T(\varphi)\Psi(\varphi) = E$ или

$$[D + \Phi(\varphi)]^T [D + \Phi(\varphi)] = \cos^2 \varphi E + \Phi^T(\varphi)\Phi(\varphi) = E,$$

так как по определению $\Phi(\varphi) + \Phi^T(\varphi) = 0$. Следовательно, условие ортогональности можно преобразовать к виду $\Phi^T(\varphi)\Phi(\varphi) = \sin^2 \varphi E$. Это условие можно переписать в виде $\Psi^T(\pi/2)\Psi(\pi/2) = E$. В частности, отсюда следует, что должно быть справедливо соотношение $\det \Psi(\pi/2) = \pm 1$, т. е. модуль определителя кососимметрической матрицы должен быть равен единице (следовательно, условие ортогональности $\det \Psi(\varphi) = \pm 1$ свели к условию $\det \Psi(\pi/2) = \pm 1$, где элементы матрицы не зависят от φ). Формализуем это условие. Известно, что определитель кососимметрической матрицы нечетного порядка равен нулю (матрица является особой), а четного порядка может быть представлен в виде квадрата некоторого многочлена от элементов матрицы. Этот многочлен называется *пфаффиан*. Термин был введен Артуром Кэли, а свое название данный многочлен получил в честь немецкого математика Йохана Фридриха Пфаффа. Следовательно, условие ортогональности может быть преобразовано к виду $\det \Psi(\pi/2) = \text{Pf}^2[\Psi(\pi/2)] = 1$ или $\text{Pf}[\Psi(\pi/2)] = \pm 1$. В матричном виде это условие выглядит следующим образом:

$$\text{Pf}^2[\Psi(\pi/2)] = \det \begin{pmatrix} 0 & \hat{\delta}_{21} & \dots & \hat{\delta}_{N1} \\ -\hat{\delta}_{21} & 0 & \dots & \hat{\delta}_{N2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\hat{\delta}_{N1} & -\hat{\delta}_{N2} & \dots & 0 \end{pmatrix} = 1.$$

В частности, при $N = 2$ получаем, что должно выполняться условие $\text{Pf}[\Psi(\pi/2)] = \hat{\delta}_{21} = \pm 1$, а при $N \geq 4$ $\text{Pf}[\Psi(\pi/2)] = \hat{\delta}_{21}\hat{\delta}_{43} - \hat{\delta}_{31}\hat{\delta}_{42} + \hat{\delta}_{32}\hat{\delta}_{41} = \pm 1$. Это тождество будет выполняться, например, если выполнены условия $\hat{\delta}_{21}\hat{\delta}_{43} = \pm 1$, $\hat{\delta}_{31}\hat{\delta}_{42} = 0$, $\hat{\delta}_{32}\hat{\delta}_{41} = 0$. Все предыдущие выкладки были сделаны в предположении, что на элементы матрицы не накладывались ограничения. Итак, получили условия ортогональности в виде равенства пфаффиана $\text{Pf}[\Psi(\pi/2)] = \pm 1$ и равносильного ему равенства $\det \Psi(\pi/2) = 1$.

Таким образом, чтобы проверить ортогональность преобразований необходимо:

а) для фиксированной базисной системы $\{\psi_v(t)\}$, $v = \overline{1, N}$ вычислить преобразования Гильберта: $\{\hat{\psi}_v(t)\}$, $v = \overline{1, N}$;

б) вычислить элементы матрицы — скалярные произведения $\hat{\delta}_{\mu\nu}$, $v, \mu = \overline{1, N}$:

$$\hat{\delta}_{\mu\nu} = (\Psi_\mu, \hat{\Psi}_\nu) = \int_0^T \Psi_\mu(t) \hat{\Psi}_\nu(t) dt, \\ v, \mu = \overline{1, N};$$

в) проверить выполнение тождества $\text{Pf}[\Psi(\pi/2)] = \pm 1$. Если это условие выполняется, то преобразования координат — ортогональные, в противном случае — нет.

Нетрудно убедиться, что если заданы базисные функции $\{\psi_v(t)\}$, $v = \overline{1, N}$ и для них, в частности, выполняется условие

$$\hat{\delta}_{\mu\nu} = \delta_{\left\lfloor \frac{\mu+1}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{\nu+1}{2} \right\rfloor}, \quad v, \mu = \overline{1, N},$$

где

$$\delta_{\mu\nu} = \begin{cases} 1, & v = \mu, \\ 0, & v \neq \mu \end{cases}$$

— символ Кронекера и $[x] = \text{ent}(x)$ — целая часть числа x , то матрица преобразования будет ортогональной. Эти условия означают, что преобразования Гильберта от базисных функций должны удовлетворять условию $\hat{\Psi}_v = \Psi_{v+1}$, $\hat{\Psi}_{v+1} = -\Psi_v$, где v — нечетно. Эти условия будут выполняться, если в качестве базисных функций выбрать, например, ортонормированную систему $\left\{ \sqrt{\frac{2}{T}} \sin \omega_v t, \sqrt{\frac{2}{T}} \cos \omega_v t \right\}$, $v = \overline{1, N/2}$. Другие примеры ортонормированного базиса, удовлетворяющего данным условиям, можно найти в работе [11].

Литература

1. **Прокис Дж.** Цифровая связь: Пер. с англ. / Под ред. Д. Д. Кловского. — М.: Радио и связь, 2000. — 800 с.
2. **Скляр Б.** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. — М.: Вильямс, 2003. — 1104 с.
3. **Коржик В. И.** Расширенное преобразование Гильберта и его применение в теории сигналов // Проблемы передачи информации. 1969. Т. 5. Вып. 4. С. 3–18.
4. **Тихонов В. И., Миронов М. А.** Марковские процессы. — М.: Сов. радио, 1977. — 488 с.
5. **Савищенко Н. В.** Помехоустойчивость модемов с двумерными сигнальными конструкциями по точным формулам вероятности ошибки в канале без замираний и с общими четырехпараметрическими замираниями // Информационно-управляющие системы. 2007. № 4. С. 44–54.
6. **Савищенко Н. В.** Многомерные сигнальные конструкции: их частотная эффективность и помехоустойчивость приема: Монография / Под ред. Д. Л. Бураченко. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. — 420 с.
7. **Справочник по специальным функциям** / Под ред. А. Абрамовица и И. Стиган. — М.: Наука, 1979. — 832 с.
8. **Попов Б. А., Теслер Г. С.** Вычисление функций на ЭВМ: Справочник. — Киев: Наук. думка, 1984. — 600 с.
9. **Возенкрафт Дж., Джекобс И.** Теоретические основы техники связи: Пер. с англ. / Под ред. Р. Л. Добрушина. — М.: Мир, 1969. — 640 с.
10. **Israel Korn, John P. Fonseka, Shaohui Xing.** Optimal binary communication with nonequal probabilities // IEEE Transactions on communications. Sep. 2003. Vol. 51. N 9. P. 1435–1438.
11. **Витерби А. Д., Омура Д. К.** Принципы цифровой связи и кодирования: Пер. с англ. / Под ред. Зигангирова. — М.: Радио и связь, 1982. — 536 с.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Информационно-управляющие системы» выходит каждые два месяца. Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 3600 руб., для зарубежных подписчиков — 4200 руб., включая НДС 18 % и почтовые расходы.

На электронную версию нашего журнала вы можете подписаться на сайте *РУНЭБ* (<http://www.elibrary.ru>).

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогам:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс;

«Пресса России» — № 42476,

а также используя услуги посредников:

«Издательский дом «Экономическая газета»:

Москва, тел.: (499) 152-88-51, 661-20-30, e-mail: akdi@akdi.ru, izdatcat@eg-online.ru;

«Северо-Западное Агентство «Прессинформ»:

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05, факс: (812) 337-16-27,

e-mail: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru, сайт: <http://www.pinform.spb.ru>;

Подписное агентство «МК-Периодика» (РФ + 90 стран):

тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47, факс: (495) 681-37-98,

e-mail: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>;

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье):

тел.: (495) 787-38-73 (многоканальный), факс: (495) 152-54-81,

e-mail: Alfimov@viniti.ru, сайт: <http://www.informnauka.com>;

«Артос-Гал»:

Москва, тел.: (495) 603-27-28, 603-27-33, 603-27-34, факс: (495) 603-27-28,

сайт: <http://www.artos-gal.mpi.ru/index.html>;

«Интерпочта»:

Москва, тел.: (495) 500-00-60, 580-95-80,

e-mail: interpochta@interpochta.ru, сайт: <http://www.interpochta.ru>;

Краснодар, тел.: (861) 210-90-00, 210-90-01, 210-90-55, 210-90-56, e-mail: krasnodar@interpochta.ru;

Новороссийск, тел.: (8617) 67-04-74;

«Коммерсант-Курьер»:

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, факс: (843) 291-09-47,

e-mail: kazan@komcur.ru, сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>;

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ): сайт: <http://www.ural-press.ru>;

«ИнфоЦентр»: сайт: <http://www.exponet.ru>;

«SetBook»: сайт: <http://www.setbook.ru>

и др.

УДК 004.89

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА И МЕТОДОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ВСТРАИВАЕМЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

А. Е. Васильев,

канд. техн. наук, доцент

А. В. Криушов,

старший преподаватель

М. М. Шилов,

старший преподаватель

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Рассматриваются особенности построения, обобщенная структура встраиваемых интеллектуальных систем управления и проблемы подготовки квалифицированных специалистов в этой области. Описаны организация и используемые программно-аппаратные средства лаборатории встраиваемых интеллектуальных систем управления.

Ключевые слова — встраиваемая интеллектуальная система управления, нечеткий регулятор, система технического зрения, многозвенное манипуляционное устройство, супервизорное управление.

Особенности современного этапа развития методов и средств автоматического управления обуславливаются усилением степени влияния тенденций, действующих в этой области техники на протяжении последних 20–25 лет; отметим из них две группы наиболее значимых.

К *первой группе* относятся тенденции алгоритмической, системотехнической и конструктивной интеграции устройства управления и объекта, что позволяет говорить об эволюционировании систем управления в направлении встраиваемых систем. Тенденции такого рода проявляются в широком применении устройств управления, разработанных с исходной ориентацией на определенный класс или группу объектов. Аппаратными платформами таких встраиваемых систем управления, как правило, служат специализированные вычислительные системы: микроконтроллеры, микросхемы с программируемой структурой или их гибриды, — что обеспечивает достижение рекордных массогабаритных показателей устройства управления и возможность гибкого изменения алгоритма управления (как проектировщиками в процессе модернизации, так и средствами автоматической адаптивной моди-

фикации в процессе функционирования). Область применения таких встраиваемых систем довольно широка — промышленная автоматика, средства связи, медицинская аппаратура, бытовая техника и др. Следует отметить, что использование специализированных вычислительных систем устанавливает дополнительные ограничения на допустимую (т. е., косвенно, и на необходимую) производительность вычислений, а также предъявляет ряд специфических требований к процессу проектирования, в частности, связанных с расчетом и анализом характеристик реального времени, организацией взаимодействия с аппаратными модулями и др.

К *второй группе* относятся тенденции вовлечения в сферу практического использования так называемых «сложных» объектов. К этому широкому классу принадлежат объекты с высоким порядком уравнений в математическом описании; не полностью наблюдаемые и не полностью управляемые объекты; системы, функционирующие в условиях не полностью определенной внешней среды или по слабо алгоритмизируемым законам; системы с не полностью определенными целями управления и критериями оценки каче-

ства их функционирования. К этой же группе относятся тенденции роста требований к качеству управления объектами, ужесточение существующих и предъявление новых ограничений к режимам эксплуатации систем автоматического управления [1].

Решение задач управления в данной постановке средствами традиционного математического аппарата теории управления затруднено или практически невозможно — особенно с учетом противоречивости тенденций первой и второй групп: наличием ограничений, связанных с используемой элементной базой и вытекающих из необходимости встраиваемости, с одной стороны, и предъявлением требований расширения функциональных возможностей — с другой. В качестве методов решения таких задач все шире применяются методы теории интеллектуальных систем. Примерами базовых вычислительных технологий, часто применяемых в задачах интеллектуального управления, являются нечеткие и нейросетевые технологии, генетические алгоритмы и др. [2, 3].

Таким образом, в данном контексте уместно говорить о встраиваемых интеллектуальных системах управления (ВИСУ), сочетающих доступность (в смысле простоты использования, дешевизны и т. п.) и надежность встраиваемых систем с пригодностью для реализации сложных алгоритмов интеллектуального управления. При этом, безусловно, необходима трансформация методов и средств проектирования интеллектуальных систем, учитывающая особенности встраиваемых систем (в частности, меньшую вычислительную мощность, ограничения по ресурсам памяти в сравнении с вычислительными системами общего назначения и др.; постоянное совершенствование обеих ветвей вычислительной техники из поколения в поколение продолжает подтверждать эти соотношения) и обеспечивающая гармоничное сочетание интеллектуальных и встраиваемых технологий.

Функционирование ВИСУ (рис. 1) подчинено задаваемой извне (однократно в процессе синтеза системы или динамически корректируемой в процессе ее функционирования) цели, формируемой метасистемой (субъектом) управления.

Исполнительный уровень ВИСУ оперирует непосредственно с физическими сигналами управления и состояния объекта, реализуя традиционную схему управления с обратными связями.

Принятие решений в смысле адаптивного интеллектуального управления реализуется вышележащими уровнями на основе баз знаний (возможно, пополняемых в процессе функционирования), индексированных информацией (как правило, обобщенной) о текущем состоянии системы.



■ Рис. 1. Обобщенная структура трехуровневой модели ВИСУ

При необходимости существенно улучшить качество функционирования или невозможности достичь поставленной цели верхний (стратегический) уровень может принять решение о смене принципа функционирования (об изменении типа движения).

Возможны и в ряде случаев практически целесообразны распределенные варианты ВИСУ, в которых указанные уровни управления территориально разделены.

Существенный научный интерес представляют задачи анализа ВИСУ (разработка формальной модели, аналитического аппарата и средств автоматизации) и их синтеза (разработка процедуры построения и итеративного уточнения синтезируемой модели, а также разработка соответствующих средств автоматизации).

В методическом смысле значимой является задача подготовки специалистов, способных выполнять разработку ВИСУ для технических объектов в кооперации со специалистами смежных предметных областей (как правило, в процесс разработки вовлекаются специалисты целевой предметной области, конструкторы, специалисты по электронике, автоматике, вычислительным системам и др.).

Таким образом, обучение будущих специалистов в области ВИСУ следует вести, сообразуясь с примерами предметных областей, актуальных в настоящем и имеющих перспективу в будущем, характеризующихся достаточной общностью используемых подходов, позволяющей специалистам адаптироваться к конкретным разноплановым практическим задачам. При этом такие предметные области должны обладать отме-

ченными выше чертами междисциплинарности и сложности.

В достаточной мере указанной постановке удовлетворяет предметная область робототехники [4]; для аргументации данного утверждения следует выделить некоторые значимые особенности этой предметной области.

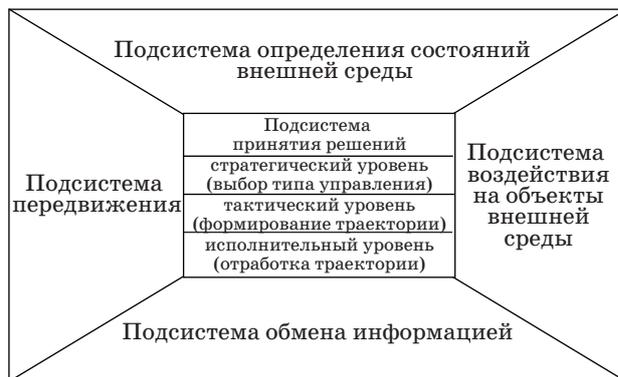
Развитие робототехники характеризуется существенным расширением области практического применения робототехнических систем (РТС). Помимо решения задач автоматизации технологических процессов в промышленности, РТС все шире применяются для решения задач, характеризующихся высокой степенью неопределенностей разного рода (относящихся к целевым объектам, внешней среде и пр.). Дополнительным фактором является потребность в автономном функционировании робототехнической системы (и, следовательно, в автономном принятии ею решений). Очевидна тенденция к ужесточению существующих и появлению принципиально новых требований к функциональным возможностям РТС, что, в свою очередь, приводит к возрастанию сложности их архитектурной организации; кроме того, в подавляющем большинстве случаев задача разработки РТС носит существенно междисциплинарный характер.

В постановке задач автоматизации для целей робототехники предполагается проектирование систем, характеризующихся простотой и высокой надежностью, минимизированными массогабаритными, стоимостными, энергетическими показателями, пригодных для конструктивного объединения с РТС (относящихся, таким образом, к классу встраиваемых систем управления), при этом обладающих способностью к интеллектуальному управлению (т. е. управлению в не полностью определенных условиях, в том числе с применением различных методов адаптации). На этом основании можно заключить, что проблемная область РТС хорошо согласуется с целями и задачами ВИСУ.

Таким образом, весьма актуальным представляется рассмотрение задач автоматизации (и, в частности, проектирования ВИСУ) на примере проблемной области робототехники.

Помимо механических и электромеханических подсистем, реализующих непосредственное взаимодействие РТС с объектами и внешней средой (рис. 2), не меньшую значимость имеют подсистемы определения состояния внешней среды (разнообразные датчики, например, системы технического зрения) и подсистемы принятия решений о качественных и количественных характеристиках управляющих воздействий.

Для подготовки специалистов в области ВИСУ необходимы профильные курсы, обеспеченные



■ Рис. 2. Обобщенная структура робототехнической системы

лабораторной базой, организованные на кафедрах, специализирующихся в области автоматике, управления и вычислительных систем.

В качестве примера рассмотрим организацию лаборатории ВИСУ кафедры автоматике и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Взаимосвязь учебных дисциплин, поддерживаемых лабораторией, со смежными дисциплинами показана на рис. 3.

Цель курса «Программно-аппаратные средства встраиваемых систем» — дать студентам знания методов и средств проектирования, отладки и диагностирования встраиваемых вычислительных систем на базе микроконтроллеров, основных принципов разработки встраиваемых систем управления исполнительными устройствами, основных принципов описания, разработки и применения адаптивных систем с элементами интеллектуального управления; привить практические навыки проектирования ВИСУ.

В лабораторном практикуме курса рассматриваются задачи разработки и исследования нечетких систем принятия решений; проводятся исследования возможностей аппаратных средств встраиваемых систем управления на примере вычислителя нечетких логических функций; систем передвижения и интеллектуального управления локомоциями колесных, гусеничных и шагающих конструкций; манипуляционных систем и интеллектуального управления многосвязными манипуляторами; систем технического зрения (СТЗ), сбора и интеллектуальной обработки данных в СТЗ.

Цель курса «Современные проблемы автоматизации и управления» — дать студентам знания актуальных аспектов развития теории управления и теории систем; отличительных особенностей сложных систем и задач управления техническими объектами; математических моделей,



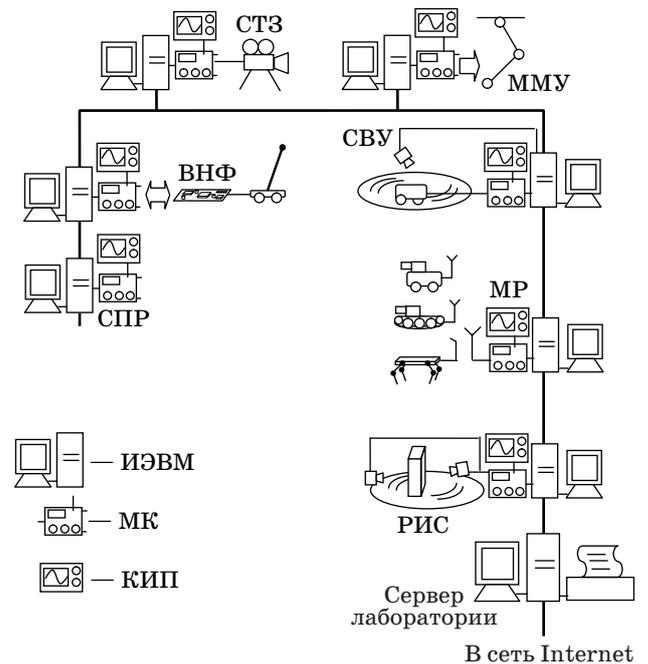
Рис. 3. Взаимосвязь учебных дисциплин

принципов описания, построения и применения элементов интеллектуальных систем; архитектурных решений, применяемых при их практической реализации; методов проектирования таких систем.

В лабораторном практикуме курса решаются задачи разработки и исследования ВИСУ с применением систем виртуальной реальности; моделирования ВИСУ; исследования распределенных ВИСУ; выполняются комплексные исследования ВИСУ на примере колесных, гусеничных и шагающих мини-роботов.

Кроме того, в лаборатории проводится ряд научных исследований, а также готовятся выпускные работы студентов.

Лаборатория (рис. 4) содержит семь автоматизированных рабочих мест (АРМ), представляющих собой многофункциональные аппаратно-программные комплексы для проведения



- СПР — системы принятия решений
- ВНФ — аппаратные вычислители нечетких логических функций
- СТЗ — системы технического зрения
- ММУ — многозвенные манипуляционные устройства
- СВУ — системы управления с супервизорным наблюдением
- МР — система управления мобильным роботом
- РИС — распределенная интеллектуальная система

- ИЭВМ — инструментальная ЭВМ
- МК — стенд микроконтроллера
- КИИП — контрольно-измерительные приборы

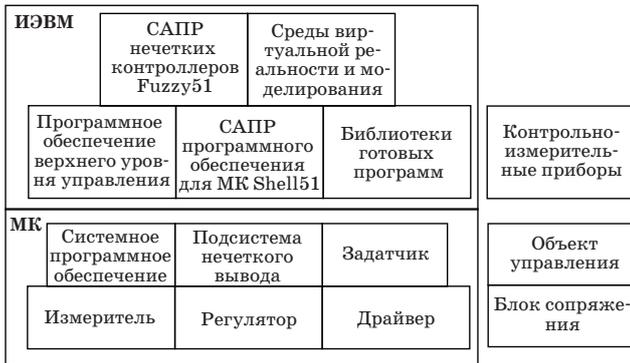
Рис. 4. Структура лаборатории ВИСУ

учебных исследований каждого компонента РТС и выполнения научных экспериментов по тематике ВИСУ.

В качестве вычислительной аппаратной платформы исполнительного уровня выбраны микроконтроллеры (МК) семейства MCS-51. Как отмечалось, МК являются одним из широко применяемых видов аппаратного обеспечения встраиваемых систем, а семейство MCS-51 является классическим образцом МК и в то же время стандартом de facto подобных систем. Конкретным используемым подсемейством является InfineonC515 как известное студентам из предшествующих дисциплин.

В состав каждого АРМ входят (рис. 5):

— инструментальная ЭВМ (позволяющая выполнять моделирование, проектирование и отладку нечетких систем, проектирование и отладку программного обеспечения (ПО) МК, а также



■ Рис. 5. Обобщенная структура АРМ

обеспечивающая решение задач стратегического управления и сбора данных);

— микроконтроллер МК (реализующий процесс интеллектуального управления реальным объектом);

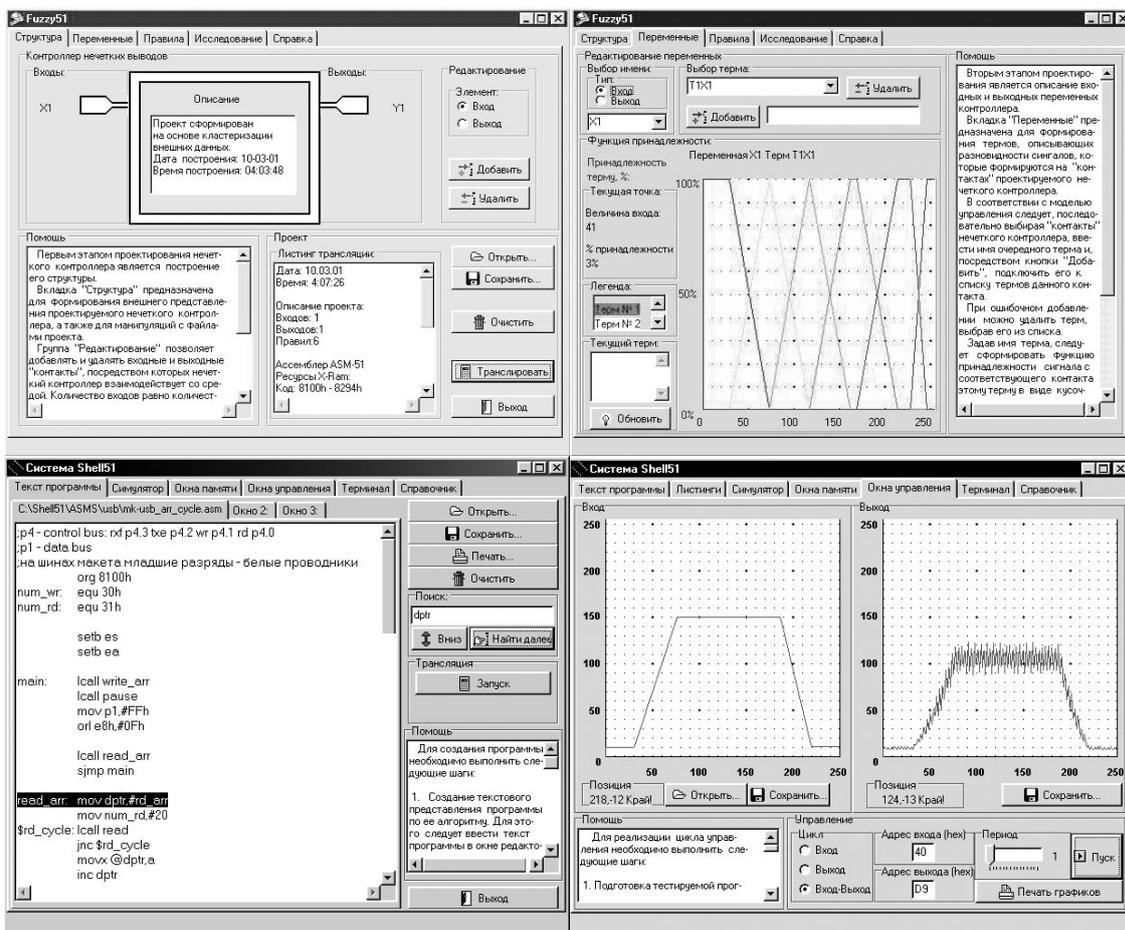
— целевой объект управления (обеспечивающий физическую достоверность эксперимента), снабженный блоком сопряжения с МК;

— контрольно-измерительные приборы (предоставляющие возможность регистрации физических процессов, протекающих на исполнительном уровне управления).

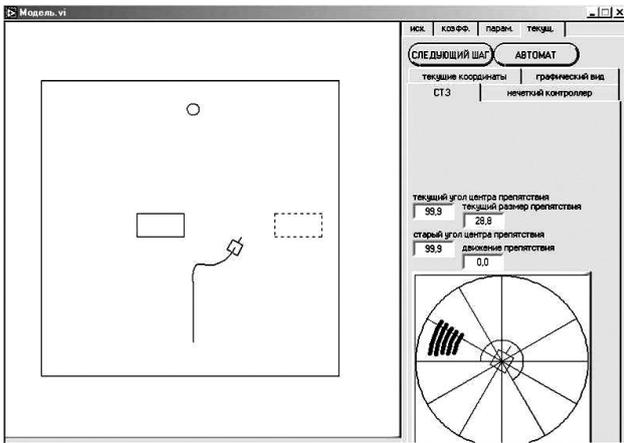
Основные компоненты авторского ПО показаны на рис. 6.

Краткие сведения об АРМ представлены ниже в таблице; рассмотрим более подробно некоторые их особенности.

Используемая в АРМ систем принятия решений модель нечеткого контроллера может быть построена на основе эвристически сформированной или автоматически сгенерированной базы нечетких знаний [5]. В последнем случае для ее формирования необходимо наличие репрезентативной базы данных, содержащей наборы эталонных реакций системы в различных ситуациях. Для накопления такой базы данных применимо моделирование функционирования системы в среде виртуальной реальности. Конкретным рассматриваемым примером является моделирование управления мобильным роботом в априорно неопределенной среде с препятствиями (рис. 7). Сформированная модель нечеткого контроллера



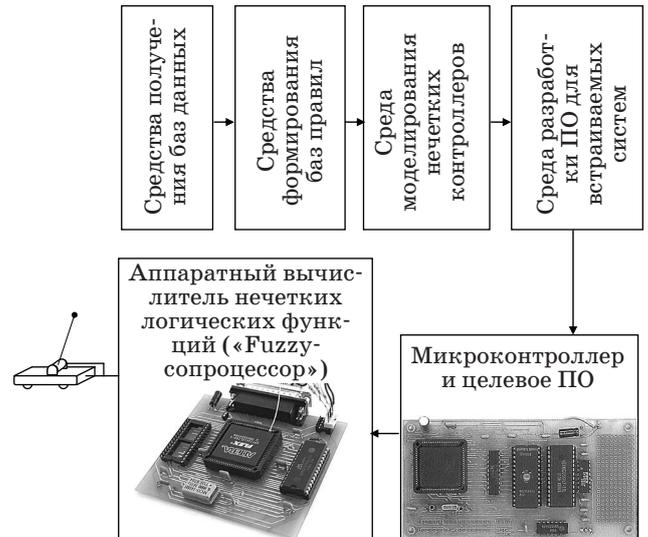
■ Рис. 6. Программное обеспечение проектирования и отладки встраиваемых систем



■ Рис. 7. Пример моделирования нечеткой системы принятия решений

автоматически преобразуется в эквивалентный программный код для встраиваемой системы на базе МК 51-й серии.

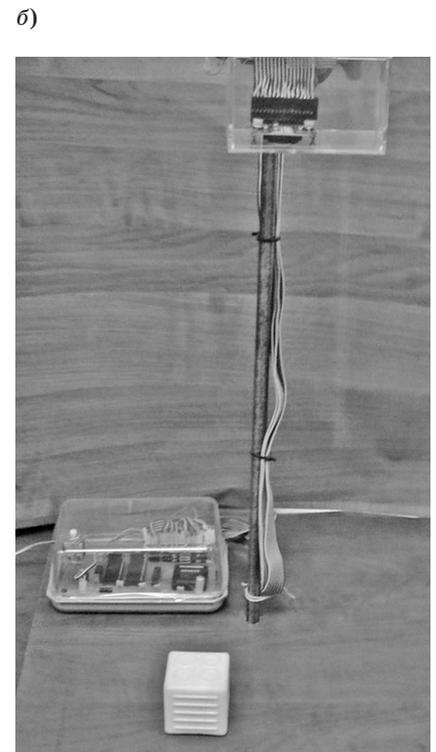
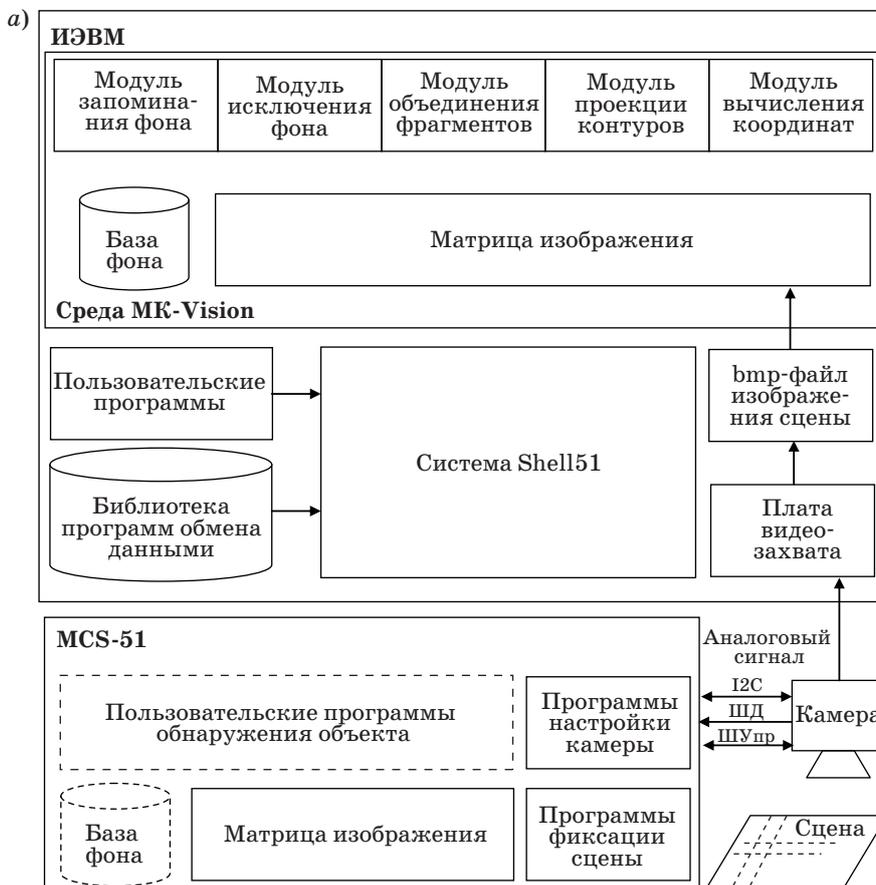
Логически связана с вышеуказанной группой вопросов проблема аппаратной реализации системы принятия решений с помощью нечеткого сопроцессора — аппаратного ВНФ. Данное АРМ позволяет выполнить сравнительный анализ производительности программных и аппа-



■ Рис. 8. Структура АРМ по исследованию аппаратных нечетких вычислителей

ратных реализаций систем принятия решений (рис. 8).

Аппаратный вычислитель авторской разработки реализован на базе микросхем программируемой логики; команды загрузки баз правил



■ Рис. 9. Структура (а) и внешний вид (б) АРМ для исследований систем технического зрения

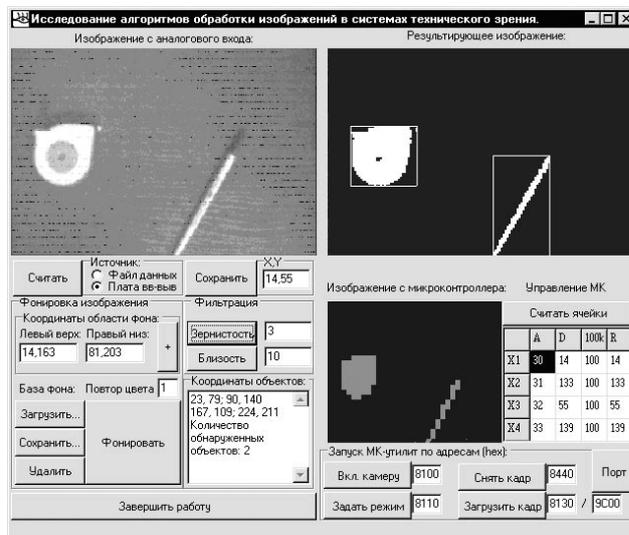
и выполнения функций нечеткого сопроцессора поступают от основного МК через порты ввода-вывода. Особенности функционирования (в том числе показатели производительности) аппаратной и программной реализаций нечеткого вычислителя исследуются на примере задачи поддержания неустойчивого равновесия перевернутого маятника.

В АРМ по исследованию систем технического зрения изображение с выхода видеокamеры передается как на инструментальную ЭВМ, так и на микроконтроллер (рис. 9, а, б). Это позволяет создавать и исследовать различные прототипные алгоритмы обнаружения и распознавания объектов на ЭВМ [6], переносить эти алгоритмы на микроконтроллер и оценивать их производительность. Пример обнаружения объектов на изображении, полученном с камеры, представлен на рис. 10.

Схожей проблематикой обладает АРМ СВУ (рис. 11, а, б). На вращающемся диске размещен объект управления (макет мобильного робота) и препятствия. Координаты местоположения объекта и препятствий на сцене вычисляются на основе анализа изображения, поступающего с видеокamеры в ИЭВМ. Вычисленные координаты используются нечеткой системой управления, реализованной на МК, для формирования управляющих воздействий, предотвращающих столкновение объекта с препятствиями. Угловую скорость диска можно регулировать для оценивания предельной производительности интеллектуальных вычислений.

Автоматизированное рабочее место по исследованию ММУ (рис. 12, а, б) содержит программную подсистему адаптивного (генетического) синтеза алгоритмов движения исполнительных механизмов в трехмерном пространстве. После получения на программной модели объекта управления предварительных результатов возможна автоматическая генерация кода для встраиваемой системы управления и проведение дальнейших испытаний на натурной модели отдельной конечности шагающего робота. Кроме того, возможна реализация координированного управления совокупностью конечностей, обеспечивающего передвижение шагающей платформы.

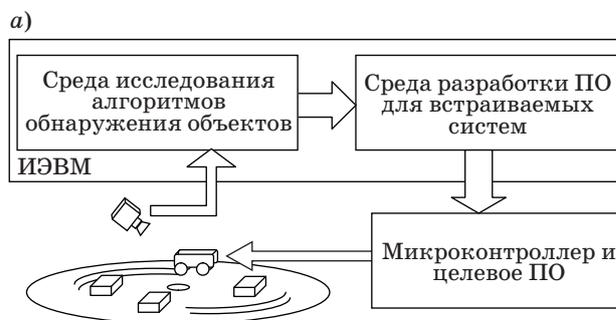
Автоматизированное рабочее место по исследованию РИС (рис. 13, а, б) имеет два ортогонально расположенных инфракрасных датчика дистанции с изменяемым посредством сервоприводов направлением наблюдения объекта (или совокупности объектов), расположенного на поворотном столе. Определение координат, ориентации и контура объекта (объектов) в общем случае возможно лишь при совокупной обработке информации, полученной от каждого из датчиков. Такая



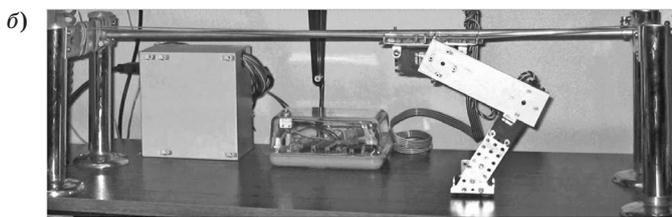
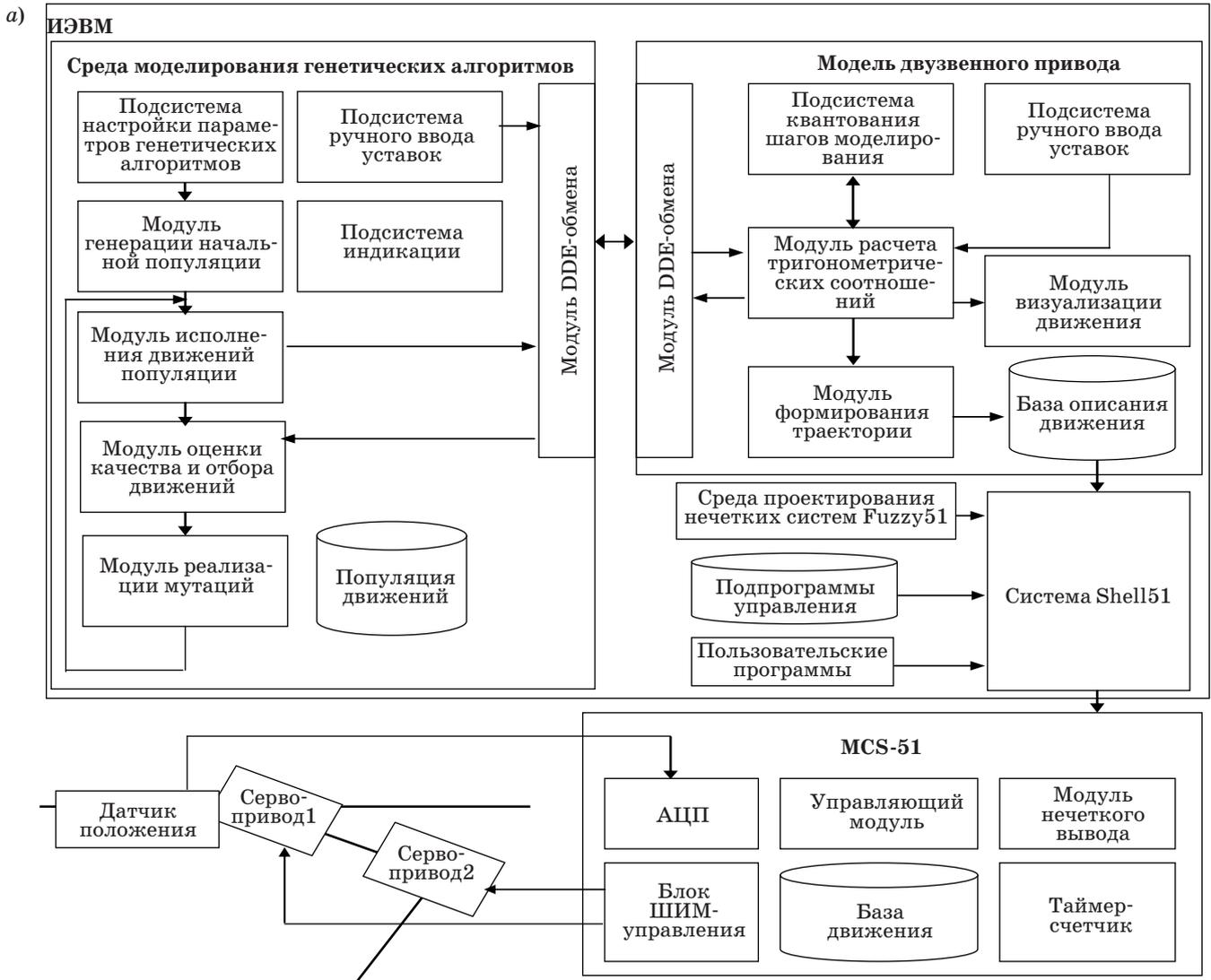
■ Рис. 10. Программное обеспечение для исследования алгоритмов обнаружения объектов на изображении

обработка проводится на аппаратной платформе микроконтроллерной ВИСУ.

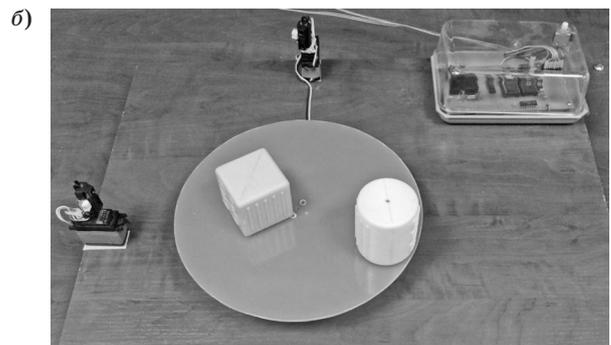
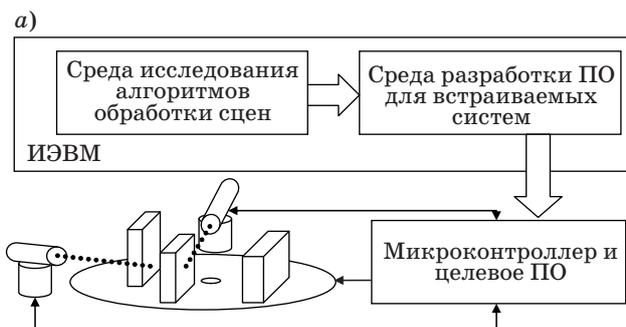
Автоматизированное рабочее место по исследованию ВИСУ МР позволяет реализовать и испытать опробованные в предыдущих работах мо-



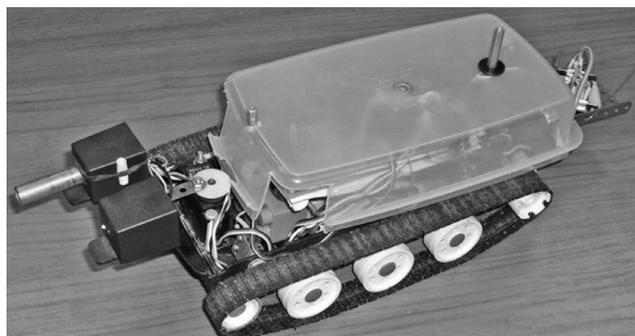
■ Рис. 11. Структура (а) и внешний вид (б) АРМ для исследований систем супервизорного управления



■ Рис. 12. Структура (а) и внешний вид (б) АРМ для исследования многозвенных манипуляционных устройств



■ Рис. 13. Структура (а) и внешний вид (б) АРМ для исследований распределенных систем



■ Рис. 14. Внешний вид АРМ для исследования встраиваемых систем управления мобильными роботами

дели алгоритмов интеллектуального управления на автономной мобильной платформе на базе натурального четырехколесного, шагающего или гу-

сеничного шасси (рис. 14). Данные платформы снабжены специализированными инфракрасными СТЗ и воспринимают по радиоинтерфейсу команды телеуправления от ИЭВМ. Рассматриваемые системы управления мобильными объектами построены в соответствии с трехуровневой моделью ВИСУ и позволяют практически применять принципы иерархического и модульного подходов к построению сложных робототехнических систем [7, 8].

В таблице представлено краткое описание АРМ, применяемых в настоящее время в учебном процессе лаборатории ВИСУ.

Авторам представляется, что подобная организация научно-исследовательской лаборатории позволяет придать большую проблемную ориентированность процессу подготовки специалистов в области автоматизации и вычислительной техники, повысить потенциальное качество результа-

Наименование АРМ (рисунок)	Цель исследований	Задачи исследований
1. Системы принятия решений (рис. 7)	Приобретение знаний и развитие навыков, необходимых для разработки нечетких контроллеров движения мобильных роботов с применением компьютерных моделей	Проектирование, отладка и исследования программного эмулятора нечеткого контроллера на основе эвристически сформированных баз нечетких знаний для управления моделью объекта в среде виртуальной реальности
2. Аппаратные вычислители нечетких логических функций (рис. 8)	Приобретение знаний и развитие навыков, необходимых для создания систем управления динамическими объектами с применением аппаратных нечетких регуляторов	Проектирование, отладка и исследования программной и аппаратной реализации нечеткой системы поддержания неустойчивого равновесия объекта колебательной природы (перевернутого маятника)
3. Системы технического зрения (рис. 9 и 10)	Приобретение знаний и развитие навыков, необходимых для разработки программно-аппаратных средств фиксации, обнаружения и классификации объектов на визуальной сцене	Проектирование, отладка и исследования алгоритмического и программного обеспечения встраиваемых микроконтроллерных систем технического зрения оптического диапазона
4. Системы супервизорного управления (рис. 11)	Приобретение знаний и развитие навыков, необходимых для разработки систем управления передвижением на основе комбинации средств нечетких вычислений и супервизорного наблюдения	Проектирование, отладка и исследования тактического и исполнительного уровней ВИСУ адаптивного управления мобильным роботом в динамически изменяющейся обстановке внешней среды
5. Многозвенные манипуляционные устройства (рис. 12)	Приобретение знаний и развитие навыков, необходимых для создания устройств адаптивного и генетически синтезируемого управления исполнительными механизмами мобильных роботов	Генетический синтез алгоритма движения манипулятора. Проектирование, отладка и исследования нечетких средств адаптации алгоритмов движения манипулятора
6. Распределенные интеллектуальные системы (рис. 13)	Приобретение знаний и развитие навыков, необходимых для создания системы координированно функционирующих узлов сбора, интеллектуальной обработки данных и принятия решений	Проектирование, отладка и исследования средств решения задачи определения координат и формы объектов по данным от совокупности независимых подсистем технического зрения инфракрасного диапазона
7. Системы управления мобильными роботами (рис. 14)	Приобретение знаний и развитие навыков создания целевой адаптивной системы управления подвижным объектом на примере колесного, гусеничного и шагающего шасси	Проектирование, отладка и исследования комплекса подсистем стратегического, тактического и исполнительного уровня ВИСУ натурального макета мобильного робота для решения задач формирования и отработки траекторий движения в априорно не полностью определенной обстановке внешней среды

тов их деятельности и обеспечить таким специалистам дополнительную значимость на рынке труда.

Более детально с результатами работы можно ознакомиться на кафедре автоматике и вычисли-

тельной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Кроме того, авторы ответят на вопросы по электронной почте visulab@mail.ru (Васильев Алексей Евгеньевич).

Литература

1. **Proceedings Embedded World 2004 Conference** / Published by Caspar Grote, Renate Ester. — Poing, Germany: Design&Electronic, 2004. — 825 p.
2. **Рассел С., Норвиг П.** Искусственный интеллект: Современный подход: Пер. с англ. — М.: Вильямс, 2006. — 1408 с.
3. **Джонс М. Т.** Программирование искусственного интеллекта в приложениях: Пер. с англ. — М.: ДМК Пресс, 2006. — 312 с.
4. **Юревич Е. И.** Основы робототехники. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 416 с.
5. **Обработка нечеткой информации** в системах принятия решений / А. Н. Борисов, А. В. Алексеев, Г. В. Меркурьева и др. — М.: Радио и связь, 1989. — 304 с.
6. **Форсайт Д., Понс Ж.** Компьютерное зрение. Современный подход: Пер. с англ. — М.: Вильямс, 2004. — 928 с.
7. **Батенко А. П.** Управление конечным состоянием движущихся объектов. — М.: Сов. радио, 1997. — 256 с.
8. **Васильев А. Е.** Микроконтроллеры. Разработка встраиваемых приложений. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. — 304 с.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (80x@mail.ru).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.

УДК 681.3.06

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА РОСТА ПРОИЗВОДСТВА В ЭКОНОМИКЕ МУНИЦИПАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Н. А. Белобородова,
канд. эконом. наук, профессор
Ухтинский институт управления, информации и бизнеса

Рассматривается проблема усиления потенциала прогнозирования роста производства в экономике муниципального образования. Предлагаемая технология расчетов с использованием генетического алгоритма позволяет объективно решать задачи анализа факторов, обуславливающих рост производства в конкретном анализируемом периоде, определять оптимальные варианты этого роста с учетом выпуска основных видов продукции.

Ключевые слова — механизм управления, экономика муниципального образования, факторы роста производства, генетические алгоритмы.

Введение

В настоящее время для местных структур управления особую важность имеет решение задачи развития подчиненных территорий. Однако нередко возникают ситуации, когда муниципальные образования (МО) обладают развитым производственным потенциалом, имеют достаточный уровень налоговых поступлений, но при этом какого-либо существенного улучшения качества жизни населения не происходит.

Одна из причин — несовершенство механизма управления муниципальным образованием, что не позволяет эффективно использовать имеющийся производственный потенциал для обеспечения социально-экономического развития территории.

Механизм управления экономикой МО представляет совокупность форм, методов, инструментов реализации функций управления с целью создать эффективную экономическую базу улучшения качества жизни населения. Стандартный перечень функций управления включает прогнозирование, планирование, программирование, организацию, регулирование, контроль (мониторинг) [1–4].

Предпосылкой эффективного механизма управления экономикой МО является качественный прогноз развития производства, который дает местным властям информацию для определения «точек роста» и перспектив производ-

ства основных видов продукции, видения неблагоприятных тенденций и факторов развития экономики.

В настоящее время в муниципалитетах разрабатываются в основном краткосрочные прогнозы. Отсутствие прогнозных данных о динамике и перспективах развития отраслей производства, оптимальных вариантах развития сферы производства и всей экономики МО в целом приводит к тому, что очень часто главы МО при определении направлений и пропорций распределения бюджетных средств, привлечении и размещении инвестиционных проектов не имеют надежного механизма, позволяющего оценить принятое решение с учетом перспектив развития МО.

Отсюда следует необходимость усиления потенциала функции прогнозирования.

Базовые понятия теории генетических алгоритмов применительно к управлению экономическими процессами

Необходимым этапом построения прогноза является анализ данных о состоянии экономики за анализируемый период, прежде всего, состоянии производственной сферы экономики. На данном этапе исследуется отраслевая структура производства, а также показатели объема производства продукции в каждой отрасли в натуральном выражении и процентное соотношение к показателям предыдущего анализируемого периода. Пред-

лагается усилить информативность данного этапа анализа за счет:

- выявления значимых факторов, реально определяющих рост производства в экономике МО;
- определения наилучшего варианта развития производственной сферы экономики, дающего максимально возможный эффект (объем производства в денежном выражении).

В данной работе исследованы возможности генетических алгоритмов (ГА) для решения задачи поиска оптимального варианта развития производственной сферы экономики, определяющего максимальное значение объема производства в денежном выражении.

Использование ГА для решения данной задачи вызвано разнообразием вычислительных методов и алгоритмов, требуемых для реализации процедур максимизации критериальной функции оценивания. Экспериментирование с ГА позволило исследовать особенности применения данного метода, не прибегая к разработке сложного методического и программного обеспечения.

Генетический алгоритм представляет собой метод, отражающий естественную эволюцию методов решения проблем и, в первую очередь, задач оптимизации. ГА реализуют методы случайного поиска, основанные на механизмах естественного отбора и наследования.

Случайный поиск возник как научное направление в начале 60-х гг. В отечественной науке эти методы развиты как оптимизационные усилиями школы профессора Л. А. Растригина. Наиболее интересные и эффективные алгоритмы случайного поиска используют идею биологической эволюции. В 60-х гг. американский ученый Дж. Холланд представил математическую модель процесса эволюции в биологических системах, которая дала начало целому поколению эффективных поисковых процедур оптимизации, известных как генетические алгоритмы. В основе всех эволюционных алгоритмов случайного поиска лежат механизмы естественного отбора теории Дарвина и генетики: отбор экземпляров популяции, скрещивание (производство потомков) и мутация — при использовании принципа выживания наиболее приспособленных особей.

В данной статье рассматривается ГА, в котором совокупность оптимизируемых параметров представляется в виде генов, образующих хромосомную нить. Генетический алгоритм поддерживает группу хромосом (популяцию), являющихся претендентами на оптимальное решение. Применяя ряд вероятностных операторов, таких как отбор, скрещивание и мутация, генофонд популяции стремится получить большую пригодность к условиям задачи. Аналогично тому, как в про-

цессе биологического генезиса выживают и развиваются особи, наиболее приспособляющиеся к воздействию некоторых факторов окружающей среды, так и в процессе поиска оптимума прогрессируют те решения, которые наиболее пригодны (оптимальны) к условиям поставленной задачи (целевому критерию). Практически алгоритм представляет собой простые операции обмена и копирования частей хромосомных нитей, легко распараллеливается и с проблемной областью связан лишь определением функции пригодности.

Можно отметить следующие свойства ГА:

- 1) обрабатывают не значения параметров самой задачи, а их закодированную форму;
- 2) осуществляют поиск решения, исходя не из единственной точки, а из некоторой популяции;
- 3) используют только целевую функцию, а не ее производные, либо иную дополнительную информацию;
- 4) применяют вероятностные, а не детерминированные правила выбора.

Перечисленные свойства, которые можно сформулировать также как кодирование параметров, операции на популяциях, использование минимума информации о задаче и рандомизация операций, приводят в результате к устойчивости ГА и к их превосходству над другими широко применяемыми технологиями.

При описании ГА используются определения, заимствованные из генетики. Например, речь идет о популяции особей, а в качестве базовых используются понятия «ген», «хромосома», «генотип», «фенотип», «аллель». Также используются соответствующие этим терминам определения из технического лексикона, в частности, «цепь», «двоичная последовательность», «структура».

Популяция — это конечное множество особей.

Особи, входящие в популяцию, в ГА представлены хромосомами с закодированными в них множествами параметров задачи, т. е. решений, которые иначе называются точками в пространстве поиска. В некоторых работах особи называются организмами.

Хромосомы (другие названия — цепочки, кодовые последовательности) — это упорядоченные последовательности генов.

Ген (называемый также свойством, знаком или детектором) — это атомарный элемент генотипа, в частности хромосомы.

Генотип или структура — это набор хромосом данной особи. Следовательно, особями в популяции могут быть генотипы либо единичные хромосомы (в довольно распространенном случае, когда генотип состоит из одной хромосомы).

Фенотип — это набор значений, соответствующих данному генотипу, т. е. декодированная

структура или множество параметров задачи (решение, точка пространства поиска).

Очередная популяция в ГА называется поколением, а к вновь создаваемой популяции особей применяется термин «новое поколение» или «поколение потомков».

Важным понятием в ГА является функция пригодности (также функция приспособленности, функция оценки). Она представляет собой меру пригодности (приспособленности) данной особи в популяции. Эта функция играет важнейшую роль, поскольку позволяет оценить степень приспособленности конкретных особей в популяции и выбрать из них наиболее приспособленные (т. е. имеющие наибольшие значения функции пригодности) в соответствии с эволюционным принципом выживания «сильнейших».

Функция пригодности также получила свое название непосредственно из генетики. Она оказывает сильное влияние на функционирование ГА и должна иметь точное и корректное определение. В задачах оптимизации функция пригодности, как правило, оптимизируется (точнее говоря, максимизируется) и называется целевой функцией. В задачах минимизации целевая функция преобразуется и проблема сводится к максимизации. В теории управления функция пригодности может принимать вид функции погрешности, а в теории игр — стоимостной функции. На каждой итерации ГА приспособленность каждой особи данной популяции оценивается при помощи функции пригодности, и на этой основе создается следующая популяция особей, составляющих множество потенциальных решений проблемы.

Процессы эволюции, происходящие в ГА, основаны на следующем принципе: «каждый биологический вид целенаправленно развивается и изменяется для того, чтобы наилучшим образом приспособиться к окружающей среде».

Новые индивиды — решения в ГА — создаются с использованием таких генетических операторов, как отбор, скрещивание и мутация, каждый из которых отвечает за определенный процесс в развитии.

Подробнее о ГА можно найти в работах [5–8].

Применение генетического алгоритма для поиска оптимального варианта роста производства в экономике МО «ГО «Город Ухта»»

Для отладки технологии решения вышеперечисленных задач использовались ретроспективные статистические данные социально-экономического развития МО за 1999–2000 гг.

Первоначально решалась задача нахождения значимых факторов, реально определяющих рост

производства в экономике МО, по технологии, предложенной в работах [1–4, 9–11].

На основании нормативных документов определены показатели, характеризующие рост производства в МО «Городской округ (ГО) «Город Ухта»» с учетом выпуска основных видов продукции. Наименование этих показателей, а также перечень переменных, поставленных в соответствие каждому показателю, значение которых изменяется с окончанием очередного периода, приводятся в табл. 1; каждый показатель из данного списка может рассматриваться как фактор роста производства.

Согласно постановке задачи, Y — показатель, характеризующий рост производства в экономике МО, представленный в денежном выражении; Y рассматривается как зависимая переменная от остальных переменных, которые обозначены через X_i и характеризуют производство основных видов продукции в натуральном выражении.

Обработка данных включает последовательность следующих вычислительных процедур:

- исчисление прироста показателя Y за анализируемый период;
- определение пороговых значений показателя Y ;
- преобразование абсолютных значений показателя Y к бинарному виду (квантование показателей, бинаризация) на основе расчетных пороговых значений;

■ Таблица 1. Кодирование переменных

Показатель	Наименование переменной
Объем промышленного производства	Y
Добыча нефти	X_1
Производство бензина автомобильного	X_2
Производство дизельного топлива	X_3
Первичная переработка нефти	X_4
Производство деловой древесины	X_5
Производство пиломатериалов	X_6
Производство стеновых материалов	X_7
Производство хлеба и хлебобулочных изделий	X_8
Производство мяса и мясопродуктов	X_9
Производство молока и молочных продуктов	X_{10}
Сельское хозяйство: скот и птица	X_{11}
Сельское хозяйство: молоко	X_{12}
Капитальные вложения в производственную сферу	X_{13}
Производство услуг	X_{14}

- преобразование абсолютных значений каждого показателя X_i к бинарному виду (квантование, бинаризация) на основе рассчитанных пороговых значений;

- определение количества ошибок на классифицированной последовательности Y путем сравнения значений каждого X_i с данными Y за анализируемый период;

- определение списка факторов, определяющих рост производства, путем выявления тех показателей, которые имеют наименьшее количество ошибок на классифицированной последовательности данных Y за анализируемый период.

Ежемесячные изменения (прирост) показателя объема выпускаемой продукции в денежном выражении определены в табл. 2. В данном исследовании использован алгоритм квантования (бинаризации) для преобразования значений Y за анализируемый период в диапазоне значений $[0, 1]$; для этого предварительно вычислим величину ускорения A_i следующим образом:

$$A_i = Y_i - Y_{i-1} \text{ при } i = 1, \dots, n,$$

где Y_i — изменение (прирост) значения показателя Y за анализируемый период. Вычисленные значения A_i располагаются в убывающем порядке. Это необходимо для того, чтобы определить пороговую величину A^* , при которой число интервалов N_0 с величиной ускорения $A_i < A^*$ отли-

■ **Таблица 2. Классификация интервалов роста объема промышленного производства**

№ месяца	Прирост	Ускорение	Индикатор
1	116.1	–	0
2	100.9	–15.2	0
3	115.1	+14.2	1
4	123.9	+ 8.8	1
5	122.1	– 1.8	0
6	118.0	– 4.1	0
7	170.6	+ 52.6	1
8	262.7	+ 92.1	1
9	163.0	– 99.7	0
10	197.0	+ 34.0	1
11	197.0	0	0
12	227.4	+ 30.4	1
13	273.9	+ 46.5	1
14	271.9	– 2.0	0
15	332.7	+ 60.8	1
16	189.0	– 143.0	0
17	277.4	+ 88.4	1
18	249.3	– 28.1	0

чалось бы от числа интервалов N_1 , для которых $A_i \geq A^*$, не более чем на 1:

$$A^*: |N_0 - N_1| \leq 1 \text{ для нечетного } n = N_0 + N_1;$$

$$A^*: |N_0 - N_1| = 0 \text{ для четного } n.$$

В приведенных вычислениях пороговое значение $Y = 8.8$ млн р. Значение «1» индикатора означает, что величина ускорения объема промышленной продукции будет не менее 8.8 млн р. в месяц.

Для каждого из четырнадцати показателей также определена величина порога, превышение которой должно совпадать со значением «1» индикатора и «0» — в противном случае; при этом число ошибок на всех 18 точках классифицированной выборки должно быть наименьшим.

В результате выполнения процедур предобработки данных выявляются те показатели X_i , которые влияют на рост Y (т. е. определяют значение «1»), таким образом формируется совокупность факторов, определяющих рост производства. В приведенных расчетах [1–4] показано, что рост производства в экономике МО ГО в анализируемом периоде обеспечивался за счет добычи нефти, производства дизельного топлива, производства молока и молочной продукции в агропромышленном комплексе, производства молока в сельском хозяйстве (переменные X_1, X_3, X_{10}, X_{12}).

Чтобы найти оптимальный вариант развития производства (в зависимости от факторов X_1, X_3, X_{10}, X_{12}) с точки зрения получения максимального дохода в денежном выражении (Y), используем классический ГА [6], который состоит из следующих шагов:

- 1) инициализация или выбор исходной популяции хромосом;
- 2) оценка приспособленности хромосом в популяции;
- 3) проверка условия останова алгоритма;
- 4) отбор, селекция хромосом;
- 5) скрещивание;
- 6) мутация;
- 7) формирование новой популяции;
- 8) выбор «наилучшей хромосомы».

Решением будет наилучший найденный индивид.

Функция пригодности. Функция пригодности используется для характеристики оптимальности решений в ГА. В задаче максимизации более пригодно то решение, которое имеет большее значение целевой функции:

$$F = \varphi,$$

где φ — исходная максимизируемая функция.

Кодировка переменных. Каждая переменная кодируется в двоичном виде и образует один ген. Цепочка из генов образует хромосому. Для примера возьмем хромосомную нить из двух генов — для переменной X_1 и для переменной X_2 . Полагая длину каждого гена 16 бит, получим хромосомную нить из 32 нулей и единиц:

$$\underbrace{10001011011101100011000111111011}_{X_1}$$

Интерпретация хромосомы следующая. Диапазон десятичных значений, которые можно представить 16 битами, от 0 до 65535 в целых числах. Если перевести целое число в число с плавающей точкой, значение закодированной переменной будет определяться так:

$$X_i = \frac{X_i^{\text{код}}}{65535}(X_i^{\text{max}} - X_i^{\text{min}}) + X_i^{\text{min}},$$

где $X_i^{\text{код}}$ — десятичное число, соответствующее двоичному коду гена; $X_i^{\text{max}}, X_i^{\text{min}}$ — диапазон возможных значений переменной. В связи с этим данной хромосоме соответствуют значения переменных: $X_1 = 92.986$ и $X_2 = -0.23450$.

Генетический алгоритм поддерживает N хромосомных нитей (претендентов на оптимальное решение), образующих популяцию. На каждой итерации производится *отбор* из популяции наиболее пригодных хромосом и образуются родительские пары. Применяя оператор скрещивания, ГА воспроизводит новое поколение потомков, наследующих лучшие гены родителей. Для обеспечения необходимого разнообразия генетического материала (исследования новых областей в пространстве поиска) использован оператор *мутации*.

В ходе *отбора* выживают те хромосомы, которые имеют большую пригодность. Хромосомы с меньшей пригодностью отмирают и в воспроизводстве потомков не участвуют. Вероятность отбора пропорциональна пригодности:

$$P_i^{\text{отбора}} = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^N F_j}$$

В ходе *скрещивания* точка скрещивания определяется случайным образом. Далее производится обмен цифрами либо справа, либо слева от этой точки с другой разделенной подобным образом хромосомой. Например, пусть N_1 и N_2 — две хромосомы, образующие родительскую пару:

$$N_1 = 100011101110010010100101100011$$

$$N_2 = 011100101010001111011111100011$$

Точка скрещивания 

Полагая точку скрещивания там, где показано, и считая, что обмен выполняется справа, получим два потомка:

$$N_1^{\text{п}} = 100011101110010010101111100011$$

$$N_2^{\text{п}} = 011100101010001111010101100011$$

Мутация — это случайный процесс изменения значения некоторой позиции в хромосоме. Если мы имеем хромосому

$$N_1^{\text{п}} = 100011101110010010101111100011$$

Мутация 

то после мутации в 9-й позиции она приобретет вид

$$N_1^{\text{п}} = 100011100110010010101111100011$$

В результате действия операторов отбора, скрещивания и мутации реализуется направленный поиск с элементами «случайных блужданий». Каждое последующее поколение наследует лучшие признаки предыдущего в направлении движения в сторону оптимума, и в конечном счете образуется некоторое подмножество точек, отклонение от целевой функции для которых минимально.

Характерными чертами ГА являются способность решать высоконелинейные задачи, независимость от вида целевой функции, отсутствие требований к ее дифференцируемости и непрерывности, способность находить квазиоптимальное решение, близкое к глобальному, работа как с непрерывными, так и с целочисленными переменными.

Схема оценивания состояния развития экономики МО с целью определить лучший вариант развития на основе ГА следующая (рисунок).

1. *Инициализация.* Генерируем случайную начальную популяцию из N бинарных хромосом.

2. *Оценивание приспособленности хромосом в популяции. Расчет функции пригодности.* Находим значение выбранной целевой функции для каждой хромосомы в соответствии с выбранной оценкой и функцию пригодности.

3. *Воспроизводство.* Выполняем шаги 3.1–3.4, пока не создадим новую популяцию из N хромосом.

3.1. *Отбор, селекция.* С вероятностью $P_i^{\text{отбора}}$ отбираем из популяции две родительские хромосомы.

3.2. *Скрещивание.* С вероятностью скрещивания $P_{\text{скр}}$ определяем, проводить операцию скрещивания или нет. Если да, то выполняется обмен случайными позициями. В обоих случаях хромосомы переводятся в разряд потомков.



■ Генетический алгоритм в решении задачи поиска оптимального варианта развития производства МО

3.3. Мутация. С вероятностью мутации P_m меняем у хромосом-потомков случайно выбранный бит.

3.4. Создание новой популяции. Формируем новую популяцию, применяем элитизм.

4. Повторение. Переходим на п. 2 и повторяем процесс до выполнения некоторого условия окончания действия алгоритма.

5. Выбор «лучшей» хромосомы.

В результате применения ГА были получены следующие результаты:

— наилучший вариант развития производства, который обеспечивает максимальный (прогнозируемый) объем производства в денежном выражении, был получен в 12-м поколении популяции;

— при $X_1 = 73.94$ тыс. т, $X_3 = 15.42$ тыс. т, $X_{10} = 466.26$ т, $X_{12} = 626.95$ т, $Y = 331.98$ млн р.

Согласно статистическим данным, максимальный объем производства в анализируемом периоде составил 332.7 млн р., относительная погрешность — 0,21 %.

Заключение

Таким образом, предлагаемая технология расчетов с использованием ГА способствует повышению потенциала прогнозирования за счет:

- определения значимых факторов роста производства в экономике города;
- определения перспективных производств («точек роста»);
- отслеживания структурных изменений в экономике города.

Результаты применения технологии на реальных данных социально-экономического развития МО «ГО «Город Ухта» в анализируемом периоде выявили параметры и факторы, определяющие рост производства, их взаимосвязь, количественные характеристики.

Литература

1. Белобородова Н. А. Модели прогнозирования развития экономики муниципального образования «Город Ухта» с использованием нейронных сетей: Материалы науч.-техн. конф., 16–18 апреля 2001 г. / УГТУ. Ухта, 2002. — С. 176–180.
2. Белобородова Н. А. АИС прогнозирования роста производства: Материалы науч.-техн. конф., 16–18 апреля 2001 г. / УГТУ. Ухта, 2002. — С. 262–266.
3. Белобородова Н. А. Методика и модели прогнозирования развития экономики муниципального образования «Город Ухта» / УГТУ. Ухта, 2002. — 50 с.
4. Белобородова Н. А. Модели прогнозирования роста производства с использованием нейронных сетей // Изв. вузов. Сер. Нефть и газ. 2002. № 4. С. 110–117.
5. Джонс М. Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях / Пер. с англ. А. И. Осипова. — М.: ДМК Пресс, 2004. — 312 с.
6. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы, нечеткие системы / Пер. с польск. — И. Д. Рудинского. — М.: Горячая линия — Телеком, 2004. — 452 с.
7. Усков А. А., Кузьмин А. В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. — М.: Горячая линия — Телеком, 2004. — 143 с.
8. Емельянов В. В., Курейчик В. М., Курейчик В. В. Теория и практика эволюционного моделирования. — М.: Физматлит, 2003. — 432 с.
9. Щетинин В. Г. Анализ факторов экономического роста региона // Вопросы статистики. 1996. № 3. С. 40–46.
10. Щетинин В. Г., Костюнин А. В. Принятие решений на нейронных сетях оптимальной сложности // Автоматизация и современные технологии. 1998. № 4. С. 38–43.
11. Щетинин В. Г. Самоорганизация минимальной нейронной сети // Нейроинформатика и ее приложения / СО РАН. Красноярск, 1996. С. 43–44.

УДК 330.43

АГРЕГИРОВАННАЯ ОЦЕНКА РАБОТЫ СЛУЖАЩИХ КОМПАНИИ МЕТОДОМ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА

Р. Р. Рзаев,

канд. физ.-мат. наук, доцент, ведущий научный сотрудник

Э. Р. Алиев,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

Институт кибернетики Национальной академии наук Азербайджана

Рассматривается задача оперативной оценки работы персонала в компаниях. Соответствующая информационная база данных формируется и периодически обновляется на основе предлагаемой схемы оценки профессиональных качеств. В результате применения метода нечеткого логического вывода синтезируются электронные «портреты» сотрудников компании и устанавливаются тренды их профессионального роста за отчетные периоды.

Ключевые слова — лингвистическая переменная, нечеткое множество, нечеткая импликация, нечеткое отношение.

Введение

Периодическая оценка эффективности работы персонала, завоевывая в современных компаниях все большую популярность, является мощным инструментом кадровой политики. Традиционная методология ее проведения довольно проста, схема ясна и понятна: собрав и обработав информацию о каждом сотруднике, получить кадровый «портрет» компании на данном этапе.

Оценка деятельности персонала — процедура постоянная и регулярная. Она служит интересам компании и характеризуется непрерывающимся наблюдением за трудовым процессом в целом и работой каждого сотрудника в отдельности. Каждодневный контроль и «работа над ошибками» являются самым простым и надежным способом оценки эффективности персональной деятельности. Результат оценки — это установление соответствия конкретного сотрудника занимаемому им рабочему месту.

Ввиду того, что современный потребительский рынок довольно жесткий и конкурентный, каждой компании необходимо систематически «инвентаризировать» свои кадровые ресурсы на предмет соответствия динамики развития персонала динамике роста компании. Прежде всего необходимо уточнить, как при текущем ходе развития компании меняется рабочее место и что тогда происходит с сотрудником:

— адекватен ли он или не успевает за компанией;

— соответствует ли его зарплата тому, что реально показала оценка его деятельности.

Как правило, некоторые сотрудники не успевают за компанией. В результате происходит естественный отбор и ротация кадров.

В данное время оценка и управление эффективностью деятельности является одной из самых проблемных процедур в большинстве компаний, которые ее используют. Каждую компанию интересует, исполняется ли принятая стратегия сейчас и будет ли она выполняться далее. Руководству необходимы гарантии того, что каждый сотрудник на своем месте выполнит стоящие перед ним задачи в полном объеме и в строгом соответствии с принятыми планами. Поэтому для компании очень важно иметь адекватные информационные «портреты» своих сотрудников, которые предлагается формировать на основе оперативной (автоматизированной) обработки текущей персональной информации, упорядоченной по методике, изложенной в работе [1].

Методика оценки профессиональных качеств

Оценке подлежат эффективность выполнения должностных обязанностей, текущий уровень профессиональных знаний и навыков, профессионально важные качества, дисциплинирован-

ность, а также лояльность и деловой внешний вид сотрудников компании. Каждый из критериев складывается в результате обработки соответствующих показателей. После этого полученная информация упорядочивается в виде табл. 1.

Своевременность выполнения должностных обязанностей служащим компании оценивается начальником соответствующего подразделения

путем установления процента выполнения незапланированных поручений в срок и процента выполнения плана работ на месяц в рамках данного подразделения.

Оценка эффективности исполнения обязанностей, профессионально важных качеств, профессиональной компетентности, дисциплинированности и прочих показателей сотрудников осу-

■ Таблица 1. Оценка работы сотрудника компании

Критерий		Оценка по пятибалльной шкале
1.	Эффективность выполнения должностных обязанностей	
1.1.	<i>Своевременность</i>	
1.1.1.	Соблюдение сроков выполнения незапланированных поручений	% выполнения незапланированных поручений в срок (средний показатель за 1 месяц) / 20
1.1.2.	Выполнение плана работ на месяц	% выполнения плана работ на месяц в рамках подразделения (средний показатель за 1 месяц) / 20
1.1.3.	Работник всегда в срок выполняет работу, в случае необходимости — досрочно	
Итого:		
1.2.	<i>Качество / полнота</i>	
1.2.1.	Работник качественно и ответственно выполняет свои обязанности, с выраженным умением работать на конечный результат	
1.2.2.	Соблюдение требований к работе	Количество нарушений (средняя оценка за аудит)
Итого:		
2.	Уровень профессиональных знаний и навыков	
2.1.	Сотрудник способен заменить любого коллегу в своем подразделении	
2.2.	Достаточно профессиональных знаний и навыков для выполнения должностных обязанностей	
2.3.	Я доверяю мнению, оценке, профессионализму сотрудника: его оценки взвешены, обоснованы и аргументированы	
Итого:		
3.	Профессионально важные качества	
3.1.	Понятливость: мне легко и удобно с ним работать: мы говорим на одном «языке», мне не приходится повторять и объяснять по нескольку раз	
3.2.	Инициативность: инициирует решение проблем, предлагает несколько вариантов решения, проявляет инициативу в разработке и внедрении нового	
3.3.	Речь: хорошо развита, четкая, правильная, без слов-«паразитов»	
3.4.	Коммуникативные навыки: открыт для общения, умеет доступно, понятно и логично изложить свою точку зрения, способен найти контакт с любым сотрудником	
Итого:		
4.	Дисциплинированность	
4.1.	Приходит на работу вовремя	
4.2.	Не уходит с работы раньше времени	
4.3.	Не отлучается с работы	
4.4.	Не нарушает режим обеденного перерыва	
Итого:		
5.	Лояльность	
5.1.	Принимает и разделяет ценности компании, приверженность интересам фирмы имеет для него большое значение	
6.	Деловой внешний вид	
6.1.	Преобладает деловой стиль в одежде, опрятен	

■ Таблица 2. Пятибалльная система оценивания служащего компании

Критерий	5 — да, всегда	4 — да, в большинстве случаев	3 — в 50 / 50 % случаев	2 — нет, в большинстве случаев	1 — нет, практически всегда
Выполнение должностных обязанностей					
Своевременность: работник всегда в срок выполняет работу, в случае необходимости — досрочно					
Качество/полнота: работник качественно и ответственно выполняет свои обязанности с выраженным умением работать на конечный результат					
Уровень профессиональных знаний, навыков					
Сотрудник способен заменить любого коллегу в своем подразделении					
Достаточно профессиональных знаний и навыков для выполнения должностных обязанностей					
Я доверяю мнению, оценке, профессионализму работника: его оценки взвешены, обоснованы и аргументированы					
Профессионально важные качества					
Понятливость: мне легко и удобно с ним работать: мы говорим на одном «языке», мне не приходится повторять и объяснять по нескольку раз					
Инициативность: инициирует решение проблем, предлагает несколько вариантов решения, проявляет инициативу в разработке и внедрении нового					
Речь: хорошо развита, четкая, правильная, без слов-«паразитов»					
Коммуникативные навыки: открыт для общения, умеет доступно, понятно и логично изложить свою точку зрения, способен найти контакт с любым сотрудником					
Дисциплинированность					
Приходит на работу вовремя					
Не уходит с работы раньше времени					
Не отлучается с работы					
Не нарушает режим обеденного перерыва					
Прочие показатели					
Лояльность: принимает и разделяет ценности компании, приверженность интересам фирмы для него имеет большое значение					
Деловой внешний вид: деловой стиль в одежде, опрятность					

ществляется непосредственно начальником подразделения и клиентами — директорами по направлениям и начальниками других подразделений. Показатели устанавливаются и фиксируются в ежемесячных отчетах по образцу табл. 2.

Ежемесячно начальник подразделения или аудиторы по системе качества проводят внутренний аудит, оценивая *качество* выполнения работником своих должностных обязанностей. Оценка за соблюдение требований к работе фиксируется в ежемесячных отчетах и выставляется по следующему принципу:

- 1 балл присваивается, если количество нарушений разных элементов больше 4 или одного элемента больше 7;
- 2 балла — если количество нарушений разных элементов 3–4 или одного элемента 5–7;

- 3 балла — количество нарушений разных элементов 2 или одного элемента 3–4;
- 4 балла — количество нарушений одного элемента не более 2;
- 5 баллов — нарушений нет.

Количественная оценка работы сотрудников компании методом нечеткого логического вывода

Оценка работы персонала компании является многокритериальной процедурой, подразумевающей применение композиционного правила агрегирования оценки каждого сотрудника на основе информации о предпочтениях лиц, ответственных за ее проведение. Как правило, эти предпочтения формулируются в виде нечетких

суждений. Поэтому для реализации оценки работы персонала целесообразно использовать правила нечеткого вывода «если-тогда».

На этих принципах рассмотрим задачу точечной оценки альтернатив в нечеткой информационной среде рассуждений. Для ее компьютерной реализации воспользуемся одним из методов нечеткого вывода, сущность которого состоит в следующем [2].

Пусть U является множеством альтернатив, а \tilde{A} — его нечетким подмножеством, принадлежность к которому элементов из U определяется соответствующими значениями из $[0, 1]$ функции принадлежности. Предположим, что нечеткие множества \tilde{A}_j описывают возможные значения (термы) лингвистической переменной x . Тогда множество решений (альтернатив) можно характеризовать совокупностью критериев — значениями лингвистических переменных x_1, x_2, \dots, x_p . Например, в нашем случае значением «ЭФФЕКТИВНОЕ» — лингвистической переменной $x_1 = \text{Исполнение текущей работы}$ или термом «НЕОБХОДИМЫЙ» — лингвистической переменной $x_2 = \text{Уровень профессиональных знаний}$. Совокупность лингвистических переменных (критериев), принимающих подобные значения, может характеризовать представления ответственного за аттестацию лица о достаточности рассматриваемых альтернатив. Тогда, полагая $S = \text{Достаточность}$ также лингвистической переменной, типовое импликативное правило можно выразить как e_1 : "Если $x_1 = \text{НИЗКОЕ}$ и $x_2 = \text{ХОРОШИЙ}$, тогда $S = \text{ВЫСОКАЯ}$ ".

В общем виде импликативные рассуждения ответственного за оценку персонала можно представить в следующем виде:

$$e_i : \text{ "Если } x_1 = \tilde{A}_{1i} \text{ и } x_2 = \tilde{A}_{2i} \text{ и } \dots \text{ и } x_p = \tilde{A}_{pi}, \text{ тогда } S = \tilde{B}_i \text{ "}. \quad (1)$$

Далее обозначим пересечение

$$x_1 = \tilde{A}_{1i} \cap x_2 = \tilde{A}_{2i} \cap \dots \cap x_p = \tilde{A}_{pi}$$

в виде $x = \tilde{A}_i$. В дискретном случае операция пересечения нечетких множеств определяется нахождением минимума соответствующих значений их функций принадлежности, т. е.

$$\mu_{\tilde{A}_i}(v) = \min_{v \in V} (\mu_{\tilde{A}_{1i}}(u_1), \mu_{\tilde{A}_{2i}}(u_2), \dots, \mu_{\tilde{A}_{pi}}(u_p)), \quad (2)$$

где $V = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_p$; $v = (u_1, u_2, \dots, u_p)$; $\mu_{\tilde{A}_{ji}}(u_j)$ — степень принадлежности элемента u_j нечеткому множеству \tilde{A}_{ji} . Тогда высказывания вида (1) можно представить в следующей компактной форме:

$$e_i : \text{ Если } x = \tilde{A}_i, \text{ тогда } S = \tilde{B}_i. \quad (3)$$

В целях обобщения высказываний (1)–(3) обозначим базовые множества U и V в виде множества W . Тогда \tilde{A}_i соответственно будет нечетким подмножеством базового множества W , а \tilde{B}_i — нечетким подмножеством единичного интервала $I = [0, 1]$.

Для реализации правил используется операция импликации. В принятых обозначениях выберем импликацию Лукасевича

$$\mu_{\tilde{H}}(w, i) = \min_{w \in W} (1, 1 - \mu_{\tilde{A}}(w) + \mu_{\tilde{B}}(i)), \quad (4)$$

где \tilde{H} — нечеткое подмножество на $W \times I$; $w \in W$ и $i \in I$.

Аналогичным образом рассуждения (правила) e_1, e_2, \dots, e_q транспонируются в соответствующие нечеткие множества $\tilde{H}_1, \tilde{H}_2, \dots, \tilde{H}_q$. При этом, обозначая их произведение как $\tilde{D} = \tilde{H}_1 \cap \tilde{H}_2 \cap \dots \cap \tilde{H}_q$, для каждой пары $(w, i) \in W \times I$ получим

$$\mu_{\tilde{D}}(w, i) = \min_{w \in W} (\mu_{\tilde{H}_j}(w, i)), \quad j = \overline{1, q}. \quad (5)$$

В этом случае вывод об удовлетворительности альтернативы, описанной нечетким множеством \tilde{A} из W , можно определить через композиционное правило

$$\tilde{G} = \tilde{A} \circ \tilde{D}, \quad (6)$$

где \tilde{G} является нечетким подмножеством единичного интервала I . Тогда в итоге имеем

$$\mu_{\tilde{G}}(i) = \max_{w \in W} (\min \mu_{\tilde{A}}(w), \mu_{\tilde{D}}(w, i)). \quad (7)$$

Сравнение альтернатив осуществляется на основе их точечных оценок. С этой целью в начале для нечеткого подмножества $\tilde{C} \subset I$ определяются α -уровневые множества ($\alpha \in [0, 1]$) в виде $C_\alpha = \{i | \mu_{\tilde{C}}(i) \geq \alpha, i \in I\}$. Затем для каждого из них определяются средние значения соответствующих элементов $M(C_\alpha)$. В общем случае для множества,

состоящего из n элементов, $M(C_\alpha) = \sum_{j=1}^n \frac{i_j}{n}, i \in C_\alpha$.

В частности, для $C_\alpha = \{a \leq i \leq b\}$ имеет место $M(C_\alpha) = (a + b) / 2$. В случае же $0 \leq a_1 \leq b_1 \leq a_2 \leq b_2 \leq \dots \leq$

$$\leq a_n \leq b_n \leq 1 \text{ и } C_\alpha = \bigcup_{j=1}^n \{a_j \leq i \leq b_j\} \\ M(C_\alpha) = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{a_j + b_j}{2} (b_j - a_j)}{\sum_{j=1}^n (b_j - a_j)}. \quad (8)$$

Таким образом, точечную оценку нечеткого множества (альтернативы) \tilde{C} можно получить из равенства

$$F(\tilde{C}) = \frac{1}{\alpha_{\max}} \int_0^{\alpha_{\max}} M(C_2) d\alpha, \quad (9)$$

где α_{\max} — максимальное значение на \tilde{C} .

Теперь предположим, что руководству компании необходима оперативная оценка деятельности своих работников по имеющейся текущей информации, причем за основу оно приняло следующие высказывания:

e_1 : "Если работник выполняет должностные обязанности, имеет необходимый уровень профессиональных знаний и навыков, а также является дисциплинированным, то он — удовлетворяющий (отвечает требованиям)";

e_2 : "Если он вдобавок к вышеприведенным требованиям имеет профессионально важные качества, то он более чем удовлетворяющий";

e_3 : "Если он дополнительно к условиям e_2 проявляет лояльность и имеет деловой внешний вид, то он — безупречный";

e_4 : "Если он имеет все оговоренное в e_3 , кроме профессионально важных качеств, то он очень удовлетворяющий";

e_5 : "Если работник выполняет должностные обязанности, имеет необходимый уровень профессиональных знаний и навыков, обладает профессионально важными качествами, но не является дисциплинированным, то он все же будет удовлетворяющим";

e_6 : "Если работник не выполняет свои должностные обязанности и не обладает профессионально важными качествами, то он — неудовлетворяющий".

Анализ приведенных высказываний позволяет выявить по отношению к предлагаемой модели шесть экзогенных критериев, используемых для оценки работников: X_1 — выполнение должностных обязанностей; X_2 — уровень профессиональных знаний и навыков; X_3 — профессионально важные качества; X_4 — дисциплинированность; X_5 — лояльность; X_6 — деловой внешний вид, — и один эндогенный признак Y — удовлетворительность. Тогда, определив возможные значения (нечеткие термы) лингвистических перемен-

ных X_i ($i = 1, \dots, 6$) и Y , на базе приведенных высказываний можно построить нечеткие импликативные правила в следующем виде:

e_1 : "Если $X_1 =$ ЭФФЕКТИВНОЕ и $X_2 =$ НЕОБХОДИМЫЙ и $X_4 =$ ДИСЦИПЛИНИРОВАННЫЙ, то $Y =$ УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЙ";

e_2 : "Если $X_1 =$ ЭФФЕКТИВНОЕ и $X_2 =$ НЕОБХОДИМЫЙ и $X_3 =$ ДОСТАТОЧНЫЕ и $X_4 =$ ДИСЦИПЛИНИРОВАННЫЙ, то $Y =$ БОЛЕЕ ЧЕМ УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЙ";

e_3 : "Если $X_1 =$ ЭФФЕКТИВНОЕ и $X_2 =$ НЕОБХОДИМЫЙ и $X_3 =$ ДОСТАТОЧНЫЕ и $X_4 =$ ДИСЦИПЛИНИРОВАННЫЙ и $X_5 =$ ПРОЯВЛЯЕТ и $X_6 =$ ОТМЕННЫЙ, то $Y =$ БЕЗУПРЕЧНЫЙ";

e_4 : "Если $X_1 =$ ЭФФЕКТИВНОЕ и $X_2 =$ НЕОБХОДИМЫЙ и $X_4 =$ ДИСЦИПЛИНИРОВАННЫЙ и $X_5 =$ ПРОЯВЛЯЕТ и $X_6 =$ ПРИГЛЯДНЫЙ, то $Y =$ ОЧЕНЬ УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЙ";

e_5 : "Если $X_1 =$ ЭФФЕКТИВНОЕ и $X_2 =$ НЕОБХОДИМЫЙ и $X_3 =$ ДОСТАТОЧНЫЕ и $X_4 =$ НЕДИСЦИПЛИНИРОВАННЫЙ, то $Y =$ УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЙ";

e_6 : "Если $X_1 =$ НЕЭФФЕКТИВНОЕ и $X_3 =$ НЕДОСТАТОЧНЫЕ, то $Y =$ НЕУДОВЛЕТВОРЯЮЩИЙ".

Далее зададим лингвистическую переменную на дискретном множестве $J = \{0; 0,1; 0,2; \dots; 1\}$. Тогда используемые в импликативных правилах ее значения — нечеткие термы — можно задать с помощью следующих функций принадлежности [3]:

- $\tilde{S} =$ УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЙ: $\mu_{\tilde{S}}(x) = x, x \in J;$
- $M\tilde{S} =$ БОЛЕЕ ЧЕМ УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЙ: $\mu_{M\tilde{S}}(x) = \sqrt{x}, x \in J;$
- $\tilde{P} =$ БЕЗУПРЕЧНЫЙ: $\mu_{\tilde{P}}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x = 1, \\ 0, & \text{если } x < 1, \end{cases}$
- $V\tilde{S} =$ ОЧЕНЬ УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЙ: $\mu_{V\tilde{S}}(x) = x^2, x \in J;$
- $U\tilde{S} =$ НЕУДОВЛЕТВОРЯЮЩИЙ: $\mu_{U\tilde{S}}(x) = 1 - x, x \in J.$

Предположим, что необходимо провести оперативную оценку пяти сотрудников компании, т. е. на конечном множестве $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$. Оперативная информация об их деятельности за истекший период упорядочена в виде табл. 3.

■ Таблица 3. Оценка базовых показателей сотрудников по пятибалльной шкале

Условное обозначение сотрудника	Эффективность выполнения должностных обязанностей X_1	Уровень профессиональных знаний и навыков X_2	Профессионально важные качества X_3	Дисциплинированность X_4	Лояльность X_5	Деловой внешний вид X_6
u_1	2,56	3,34	2,89	3,87	2,93	4,78
u_2	3,58	2,67	3,25	3,57	3,79	2,10
u_3	4,14	4,23	2,28	4,90	3,41	4,57
u_4	2,20	3,67	3,12	2,68	4,25	4,95
u_5	4,75	4,82	4,88	3,56	4,83	2,87

Далее на основе оценок базовых показателей построим нечеткие множества рассматриваемых шести критериев по опорному вектору $(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$ с гауссовыми функциями принадлежности $\mu_{\tilde{X}}(t) = \exp(-t-5)^2 / \sigma_k^2$, где $\sigma_k, k = 1, \dots, 6$ — плотность, подбираемая с учетом приоритетности соответствующего критерия¹. При этом оценка сотруднику по каждому критерию выставляется в соответствии со значением соответствующей гауссовой функции, изменяющейся на $[0, 5]$. Например, оценка u_1 по первому критерию будет $\mu_{\tilde{X}_1}(2,56) = 0,3857$.

Таким образом, при $\sigma_1 = 2,5, \sigma_2 = 1,4, \sigma_3 = 2, \sigma_4 = 2,6, \sigma_5 = 2,8$ и $\sigma_6 = 2$ принятые критерии будут иметь следующий вид:

• ЭФФЕКТИВНОЕ (выполнение работы):

$$\tilde{A}_1 = \frac{0,3857}{u_1} + \frac{0,7242}{u_2} + \frac{0,8884}{u_3} + \frac{0,2852}{u_4} + \frac{0,99}{u_5};$$

• НЕОБХОДИМЫЙ (уровень знаний):

$$\tilde{A}_2 = \frac{0,2451}{u_1} + \frac{0,0627}{u_2} + \frac{0,7390}{u_3} + \frac{0,4056}{u_4} + \frac{0,9836}{u_5};$$

• ДОСТАТОЧНЫЕ (профессиональные качества):

$$\tilde{A}_3 = \frac{0,3286}{u_1} + \frac{0,465}{u_2} + \frac{0,1573}{u_3} + \frac{0,4133}{u_4} + \frac{0,9964}{u_5};$$

• ДИСЦИПЛИНИРОВАННЫЙ:

$$\tilde{A}_4 = \frac{0,8279}{u_1} + \frac{0,739}{u_2} + \frac{0,9985}{u_3} + \frac{0,451}{u_4} + \frac{0,7358}{u_5};$$

• ПРОЯВЛЯЕТ (лояльность):

$$\tilde{A}_5 = \frac{0,5789}{u_1} + \frac{0,8297}{u_2} + \frac{0,7244}{u_3} + \frac{0,9308}{u_4} + \frac{0,9963}{u_5};$$

• ПРИГЛЯДНЫЙ (внешний вид):

$$\tilde{A}_6 = \frac{0,988}{u_1} + \frac{0,1222}{u_2} + \frac{0,9548}{u_3} + \frac{0,9994}{u_4} + \frac{0,3217}{u_5}.$$

С учетом этих формализмов нечеткие правила сформулируем как:

e_1 : "Если $X_1 = \tilde{A}_1$ и $X_2 = \tilde{A}_2$ и $X_4 = \tilde{A}_4$, тогда $Y = \tilde{S}$ ";

e_2 : "Если $X_1 = \tilde{A}_1$ и $X_2 = \tilde{A}_2$ и $X_3 = \tilde{A}_3$ и $X_4 = \tilde{A}_4$, тогда $Y = M\tilde{S}$ ";

e_3 : "Если $X_1 = \tilde{A}_1$ и $X_2 = \tilde{A}_2$ и $X_3 = \tilde{A}_3$ и $X_4 = \tilde{A}_4$ и $X_5 = \tilde{A}_5$ и $X_6 = \tilde{A}_6$, тогда $Y = \tilde{P}$ ";

¹ Вообще конфигурация (плотность) гауссовой функции принадлежности, как, собственно, и сам набор правил, задается экспертами. Если бы авторы ставили перед собой задачу найти абсолютную (оптимальную) оценку деятельности сотрудника компании, то тогда следовало бы использовать Neural Network based Fuzzy Inference System [4].

e_4 : "Если $X_1 = \tilde{A}_1$ и $X_2 = \tilde{A}_2$ и $X_4 = \tilde{A}_4$ и $X_5 = \tilde{A}_5$ и $X_6 = \tilde{A}_6$, тогда $Y = V\tilde{S}$ ";

e_5 : "Если $X_1 = \tilde{A}_1$ и $X_2 = \tilde{A}_2$ и $X_3 = \tilde{A}_3$ и $X_4 = \neg\tilde{A}_4$, тогда $Y = \tilde{S}$ ";

e_6 : "Если $X_1 = \neg\tilde{A}_1$ и $X_3 = \neg\tilde{A}_3$, тогда $Y = U\tilde{S}$ ".

Далее для левых частей этих правил вычислим функции принадлежности $\mu_{\tilde{M}_i}(a), i = 1, \dots, 6$. В частности, имеем:

e_1 : $\mu_{\tilde{M}_1}(a) = \min\{\mu_{\tilde{A}_1}(a), \mu_{\tilde{A}_2}(a), \mu_{\tilde{A}_4}(a)\},$

$$\tilde{M}_1 = \frac{0,2451}{u_1} + \frac{0,0627}{u_2} + \frac{0,739}{u_3} + \frac{0,2852}{u_4} + \frac{0,7358}{u_5};$$

e_2 : $\mu_{\tilde{M}_2}(a) = \min\{\mu_{\tilde{A}_1}(a), \mu_{\tilde{A}_2}(a), \mu_{\tilde{A}_3}(a), \mu_{\tilde{A}_4}(a)\},$

$$\tilde{M}_2 = \frac{0,2451}{u_1} + \frac{0,0627}{u_2} + \frac{0,1573}{u_3} + \frac{0,2852}{u_4} + \frac{0,7358}{u_5};$$

e_3 : $\mu_{\tilde{M}_3}(a) = \min\{\mu_{\tilde{A}_1}(a), \mu_{\tilde{A}_2}(a), \mu_{\tilde{A}_3}(a), \mu_{\tilde{A}_4}(a), \mu_{\tilde{A}_5}(a), \mu_{\tilde{A}_6}(a)\},$

$$\tilde{M}_3 = \frac{0,2451}{u_1} + \frac{0,0627}{u_2} + \frac{0,1573}{u_3} + \frac{0,2852}{u_4} + \frac{0,3217}{u_5};$$

e_4 : $\mu_{\tilde{M}_4}(a) = \min\{\mu_{\tilde{A}_1}(a), \mu_{\tilde{A}_2}(a), \mu_{\tilde{A}_4}(a), \mu_{\tilde{A}_5}(a), \mu_{\tilde{A}_6}(a)\},$

$$\tilde{M}_4 = \frac{0,2451}{u_1} + \frac{0,0627}{u_2} + \frac{0,7244}{u_3} + \frac{0,2852}{u_4} + \frac{0,3217}{u_5};$$

e_5 : $\mu_{\tilde{M}_5}(a) = \min\{\mu_{\tilde{A}_1}(a), \mu_{\tilde{A}_2}(a), \mu_{\tilde{A}_3}(a), 1 - \mu_{\tilde{A}_4}(a)\},$

$$\tilde{M}_5 = \frac{0,1721}{u_1} + \frac{0,0627}{u_2} + \frac{0,0015}{u_3} + \frac{0,2852}{u_4} + \frac{0,2642}{u_5};$$

e_6 : $\mu_{\tilde{M}_6}(a) = \min\{1 - \mu_{\tilde{A}_1}(a), 1 - \mu_{\tilde{A}_3}(a)\},$

$$\tilde{M}_6 = \frac{0,6143}{u_1} + \frac{0,2758}{u_2} + \frac{0,1116}{u_3} + \frac{0,5867}{u_4} + \frac{0,0036}{u_5}.$$

В итоге правила запишем в более компактной форме:

e_1 : "Если $X = \tilde{M}_1$, тогда $Y = \tilde{S}$ ";

e_2 : "Если $X = \tilde{M}_2$, тогда $Y = M\tilde{S}$ ";

e_3 : "Если $X = \tilde{M}_3$, тогда $Y = \tilde{P}$ ";

e_4 : "Если $X = \tilde{M}_4$, тогда $Y = V\tilde{S}$ ";

e_5 : "Если $X = \tilde{M}_5$, тогда $Y = \tilde{S}$ ";

e_6 : "Если $X = \tilde{M}_6$, тогда $Y = U\tilde{S}$ ".

Для преобразования этих правил воспользуемся импликацией Лукасевича (4). Тогда для каждой пары $(u, j) \in U \times Y$ на $U \times Y$ получим следующие нечеткие отношения:

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
u_1	0,7549	0,8549	0,9549	1	1	1	1	1	1	1	1
u_2	0,9373	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$R_1 = u_3$	0,2610	0,3610	0,4610	0,5610	0,6610	0,7610	0,8610	0,9610	1	1	1
u_4	0,7148	0,8148	0,9148	1	1	1	1	1	1	1	1
u_5	0,2642	0,3642	0,4642	0,5642	0,6642	0,7642	0,8642	0,9642	1	1	1

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
u_1	0,7549	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
u_2	0,9373	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$R_2 = u_3$	0,8427	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
u_4	0,7148	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
u_5	0,2642	0,5804	0,7114	0,8119	0,8967	0,9713	1	1	1	1	1

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
u_1	0,7549	0,7549	0,7549	0,7549	0,7549	0,7549	0,7549	0,7549	0,7549	0,7549	1
u_2	0,9373	0,9373	0,9373	0,9373	0,9373	0,9373	0,9373	0,9373	0,9373	0,9373	1
$R_3 = u_3$	0,8427	0,8427	0,8427	0,8427	0,8427	0,8427	0,8427	0,8427	0,8427	0,8427	1
u_4	0,7148	0,7148	0,7148	0,7148	0,7148	0,7148	0,7148	0,7148	0,7148	0,7148	1
u_5	0,6783	0,6783	0,6783	0,6783	0,6783	0,6783	0,6783	0,6783	0,6783	0,6783	1

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
u_1	0,7549	0,7649	0,7949	0,8449	0,9149	1	1	1	1	1	1
u_2	0,9373	0,9473	0,9773	1	1	1	1	1	1	1	1
$R_4 = u_3$	0,2756	0,2856	0,3156	0,3656	0,4356	0,5256	0,6356	0,7656	0,9156	1	1
u_4	0,7148	0,7248	0,7548	0,8048	0,8748	0,9648	1	1	1	1	1
u_5	0,6783	0,6883	0,7183	0,7683	0,8383	0,9283	1	1	1	1	1

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
u_1	0,8279	0,9279	1	1	1	1	1	1	1	1	1
u_2	0,9373	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$R_5 = u_3$	0,9985	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
u_4	0,7148	0,8148	0,9148	1	1	1	1	1	1	1	1
u_5	0,7358	0,8358	0,9358	1	1	1	1	1	1	1	1

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
u_1	1	1	1	1	0,9857	0,8857	0,7857	0,6857	0,5857	0,4857	0,3857
u_2	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9242	0,8242	0,7242
$R_6 = u_3$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9884	0,8884
u_4	1	1	1	1	1	0,9133	0,8133	0,7133	0,6133	0,5133	0,4133
u_5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9964

В результате пересечения отношений R_1, R_2, \dots, R_6 окончательно получим общее функциональное решение

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
u_1	0,7549	0,7549	0,7549	0,7549	0,7549	0,7549	0,7549	0,6857	0,5857	0,4857	0,3857
u_2	0,9373	0,9373	0,9373	0,9373	0,9373	0,9373	0,9373	0,9373	0,9242	0,8242	0,7242
u_3	0,2610	0,2856	0,3156	0,3656	0,4356	0,5256	0,6356	0,7656	0,8427	0,8427	0,8884
u_4	0,7148	0,7148	0,7148	0,7148	0,7148	0,7148	0,7148	0,7133	0,6133	0,5133	0,4133
u_5	0,2642	0,3642	0,4642	0,5642	0,6642	0,6783	0,6783	0,6783	0,6783	0,6783	0,9964

Для вычисления удовлетворительности каждого из пяти сотрудников применим правило композиционного вывода в нечеткой среде: $\tilde{E}_k = \tilde{G}_k \circ R$, где \tilde{E}_k — степень удовлетворения k -го сотрудника; \tilde{G}_k — отображение k -го сотрудника в виде нечеткого подмножества на U^1 . Тогда, согласно (7), имеем

$$\mu_{\tilde{E}_k}(j) = \max_u (\min(\mu_{\tilde{G}_k}(u), \mu_R(u))),$$

где $\mu_{\tilde{G}_k}(u) = \begin{cases} 0, & u \neq u_k, \\ 1, & u = u_k. \end{cases}$

Отсюда следует, что $\mu_{\tilde{E}_k}(j) = \mu_R(u_k, j)$, т. е. \tilde{E}_k есть k -я строка матрицы R .

Теперь применим описанную выше процедуру для получения точечных оценок каждого из рассматриваемых сотрудников.

Итак, для первого сотрудника u_1 имеем оценку в виде нечеткого множества

$$\tilde{E}_1 = \frac{0,7549}{0} + \frac{0,7549}{0,1} + \frac{0,7549}{0,2} + \frac{0,7549}{0,3} + \frac{0,7549}{0,4} + \frac{0,7549}{0,5} + \frac{0,7549}{0,6} + \frac{0,6857}{0,7} + \frac{0,5857}{0,8} + \frac{0,4857}{0,9} + \frac{0,3857}{1,0}.$$

Вычислим ее уровневые множества $E_{j\alpha}$ и соответствующие мощности $M(E_{j\alpha})$ по формуле

$$M(E_{j\alpha}) = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}:$$

- для $0 < \alpha < 0,3857$: $\Delta\alpha = 0,3857$, $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,5$;
- для $0,3857 < \alpha < 0,4857$: $\Delta\alpha = 0,1$, $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,45$;
- для $0,4857 < \alpha < 0,5857$: $\Delta\alpha = 0,1$, $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,4$;
- для $0,5857 < \alpha < 0,6857$: $\Delta\alpha = 0,1$, $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,35$;
- для $0,6857 < \alpha < 0,7549$: $\Delta\alpha = 0,0692$, $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,3$.

Далее по формуле (9) найдем точечную оценку удовлетворительности первого сотрудника

$$F(\tilde{E}_1) = \frac{1}{0,7549} \int_0^{0,7549} M(E_{12}) d\alpha = \frac{1}{0,7549} (0,5 \cdot 0,3857 + 0,45 \cdot 0,1 + 0,4 \cdot 0,1 + 0,35 \cdot 0,1 + 0,3 \cdot 0,0692) = 0,4419.$$

Аналогичными действиями устанавливаем точечные оценки для остальных сотрудников: для сотрудника u_2 $F(\tilde{E}_2) = 0,4819$; для сотрудника u_3 $F(\tilde{E}_3) = 0,7031$; для сотрудника u_4 $F(\tilde{E}_4) = 0,4576$; для сотрудника u_5 $F(\tilde{E}_5) = 0,7133$. В качестве наиболее удовлетворяющего выбираем сотрудника, имеющего наибольшую точечную оценку. В приведенном примере это сотрудник u_5 . На втором месте — u_3 , на третьем — u_2 , на четвертом — u_4 и, наконец, на пятом — u_1 .

Программная реализация алгоритма

Для демонстрационного показа действия используемого алгоритма можно было бы ограничиться соответствующим инструментарием пакета прикладных программ MATLAB\Fuzzy Logic Toolbox или симуляцией на встроенном алгоритмическом языке MATLAB. Однако предлагаемая методика «инвентаризации кадровых ресурсов» служащих компании носит исключительно коммерческий характер и поэтому требует всеобъемлющей программной реализации.

В составе программного обеспечения SINAM Human Resources разработан модуль Persons Rating, предназначенный для формирования сравнительной оценки служащих компании. Встроенная система вывода посредством фаззификатора комбинирует как «четкие», так и нечеткие анкетные данные, ежедневную информацию о посещаемости сотрудников из автоматизированной контрольно-пропускной системы компании, а также поступающую из модуля Task Manager информацию о выполнении сотрудниками заданий и поручений. Для этого используется база данных ORACLE.

¹ \tilde{E}_k и \tilde{G}_k — нечеткие множества, построенные по опорным векторам.

Модуль Persons Rating использует различные справочники, в частности справочник Mark reasons, в котором хранятся перечень критериев (например, эффективность выполнения работы, деловой внешний вид и т. п.) и коэффициенты их важности. Коэффициенты могут быть проставлены вручную или вычислены с помощью соответствующих функций. Информация вносится в справочник с учетом особенностей конкретного предприятия и пожеланий его руководства, благодаря чему предлагаемая автоматизированная система вывода становится гибкой и универсальной.

В справочнике Rate levels отражены исходные оценки (такие как удовлетворительный, очень удовлетворительный, безупречный и т. п.), а также имплицитивные правила, по которым выставляются эти оценки.

Система вывода использует также субъективную информацию руководителя подразделения о качестве исполнения сотрудником назначенных ему поручений, о его лояльности, опрятности и деловом внешнем виде. Эта информация, оцениваемая руководителем в процентном отношении, приобщается в базу данных после трансляции на диапазон [0, 5]. Очевидно, чем чаще формируются подобные записи, тем ближе к реальности выводы системы.

Система апробирована в ICT-company SINAM Ltd/+ (Баку, Азербайджан).

Заключение

Полученные агрегированные точечные оценки профессиональных качеств пяти произвольно выбранных сотрудников не являются абсолютными, так как набор используемых лингвистических правил и параметры гауссовых функций принадлежности не оптимизированы. Да эту задачу авторы перед собой и не ставили. На основе предлагаемой методики можно периодически оценивать профессиональные качества сотрудников компании и формировать динамические ряды, отражающие их профессиональное развитие. В свою очередь ранжирование сотрудников можно осуществлять путем сравнения соответствующих им трендов развития.

Метод нечеткого логического вывода можно применить и для выявления итоговой оценки по каждому критерию в отдельности. Например, для установления эффективности выполнения должностных обязанностей можно аналогично использовать следующий набор правил:

e_1 : "Если работник соблюдает план работы на месяц и старается соблюдать требования к работе, то он эффективен";

e_2 : "Если к указанным выше требованиям он еще и соблюдает сроки выполнения незапла-

нированных поручений, то он более чем эффективен";

e_3 : "Если к указанным в приведенных выше двух правилах требованиям работник выполняет работу досрочно, то он очень эффективен";

e_4 : "Если работник соблюдает план работы на месяц, а в случае необходимости — досрочно, соблюдает сроки выполнения незапланированных поручений, выполняет свои обязанности с выраженным умением работать на конечный результат и соблюдает все требования к работе, то он в высшей степени эффективен";

e_5 : "Если работник соблюдает план работы на месяц, требования к работе, качественно и ответственно выполняет свои обязанности, но не всегда соблюдает сроки выполнения незапланированных поручений, то он все равно эффективен";

e_6 : "Если работник не соблюдает план работы на месяц и служебные требования, то он неэффективен".

Хотя приведенные правила и не являются оптимальными, чисто произвольными их тоже нельзя назвать, так как их конструкция предполагает доминирование более существенных критериев над менее. В конце концов, руководство каждой компании вправе само выбирать набор лингвистических правил, исходя из специфики собственного предприятия.

Литература

1. Васильев С. В., Жуковский А. И., Цуркер К. Эффективность работы организаций государственного и муниципального управления и их служащих // Проект Тасис «Региональное экономическое развитие и антикризисные стратегии». Подпроект-2: Рекомендации по повышению эффективности работы региональной администрации и думы через усиление профессиональной подготовки персонала в области делового администрирования. — Великий Новгород, 2002. — 70 с. <http://www.dialogvn.ru/aua/Effektiv.htm>
2. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. — М.: Финансы и статистика, 2000. — 368 с.
3. Zadeh L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. — N. Y.: American Elsevier Publishing Company, 1974. — 234 p.
4. Lin C. T., George Lee C. S. Supervised and Unsupervised Learning with Fuzzy Similarity for Neural Network — Based Fuzzy Logic Control Systems // Fuzzy Sets, Neural Networks, and Soft Computing / Edited by Yager R. R., Zadeh L. A. N. Y.: Van Nostrand Reinhold, 1994. P. 85–125.

УДК 621.396.969.34:629.735

СПОСОБ РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ГРУППОВОЙ ВОЗДУШНОЙ ЦЕЛИ

А. В. Баженов,

канд. техн. наук, профессор

И. Е. Афонин,

адъюнкт

Ставропольское высшее военное авиационное инженерное училище (военный институт) имени маршала авиации В. А. Судца

Предложен способ радиолокационного разрешения групповой воздушной цели по характеру отклика на зондирующие сигналы сложной структуры. Приведен алгоритм разрешения, реализующий этот способ.

Ключевые слова — радиолокационное разрешение, групповая воздушная цель, сигналы сложной структуры, фазоманипулированный сигнал, бортовая радиолокационная станция.

Введение

В настоящее время наиболее перспективным и эффективным способом ведения воздушной наступательной операции является групповое ведение боевых действий. Для эффективного противодействия групповой воздушной цели (ГВЦ) необходимо решать задачу целераспределения. Это, в свою очередь, требует определения количественного состава группы [1]. Также следует отметить, что боевые порядки летательных аппаратов (ЛА) образованы парами «ведущий — ведомый». Причем расстояние между ЛА в паре меньше, чем разрешающая способность РЛС, что требует дополнительных мер по разрешению такой ВЦ, а расстояния между парами ЛА, составляющими боевой порядок, превышают размеры разрешающей способности бортовых РЛС (БРЛС) и, соответственно, ВЦ разрешаются существующими БРЛС. Таким образом, наибольший интерес представляет ситуация, когда ГВЦ состоит из пары воздушных целей, поэтому под определением количественного состава будем понимать определение, парная это цель или одиночная.

Много работ посвящено задачам определения углового положения энергетического и геометрического центра объекта, а также задачам разрешения парного объекта на основе разности доплеровских портретов. Предлагаемый способ радиолокационного разрешения является альтернативой существующим методам радиолокационного разрешения групповых объектов и основан на

создании в районе ГВЦ фазового фронта электромагнитной волны, обеспечивающего синфазное отражение от ее элементов.

Основания и описание способа

Предлагаемый способ радиолокационного разрешения основан на следующих предпосылках. ГВЦ представляет собой пару однотипных воздушных целей, летящих в сомкнутом боевом порядке. Так как воздушные цели однотипны и, соответственно, имеют одинаковые характеристики отражения, то их можно представить двумя энергетическими центрами с определенными статистическими характеристиками отражения.

Зондирующий сигнал представляет собой когерентную пачку импульсов, начальная фаза каждого четного дискрета импульса меняется от пачки к пачке. Когерентная обработка и обнаружение проводятся в пределах каждой пачки («кадра» обработки).

Таким образом, для решения рассматриваемой проблемы предлагается использовать фазовую манипуляцию зондирующего сигнала в целях компенсации фазового сдвига в отраженных от отдельных целей сигналах, обусловленного пространственным разносом элементов ГВЦ, для обеспечения их синфазного приема. Причем фазовая манипуляция осуществляется таким образом, что в каждой пачке импульсов длительность отдельного импульса разбивается на элементарные временные интервалы (дискреты). В течение

одного элементарного дискрета начальная фаза радиоимпульса неизменна. В одном импульсе каждый четный элементарный дискрет имеет одинаковые значения начальной фазы $\Delta\varphi$. При переходе от пачки к пачке значение приращения $\Delta\varphi$ изменяется по линейно нарастающему закону от 0 до π .

Падение фазового фронта ЭМВ на отдельные элементы ГВЦ и фазовый фронт отраженного зондирующего сигнала с учетом скачка фазы, внесенного в зондирующий сигнал, показано на рис. 1.

Результатом применения предлагаемого способа является то, что при наличии в составе ГВЦ двух целей при одном из значений фазового сдвига отраженный сигнал будет иметь существенно большее значение амплитуды, чем при отражении от одиночной ВЦ. По отсутствию амплитудного скачка, при всех реализациях вносимого в зондирующий сигнал сдвига фазы, принимается решение о том, что цель одиночная.

Общий вид алгоритма радиолокационного разрешения ГВЦ по характеру отклика на сигналы сложной структуры представлен на рис. 2.

После обнаружения воздушной цели производится ее облучение зондирующим сигналом со сдвигом фазы четных импульсов, равным нулю, т. е. немодулированным сигналом

$$s_{\text{изл}}(t) = U_0 e^{-j(\omega t + \varphi_0)}. \quad (1)$$

Отраженные от элементов ГВЦ сигналы поступают на вход приемника бортовой РЛС, где в результате интерференции складываются, и по величине амплитуды суммарного сигнала устанавливается порог принятия решения $u_{\text{п}}$. Выбор порога производится по критерию Неймана—Пирсона:

$$s_{\text{прм1}}(t) = \sigma_1(\theta, \psi) U_0 e^{-j(\omega t + \varphi_0)}; \quad (2)$$

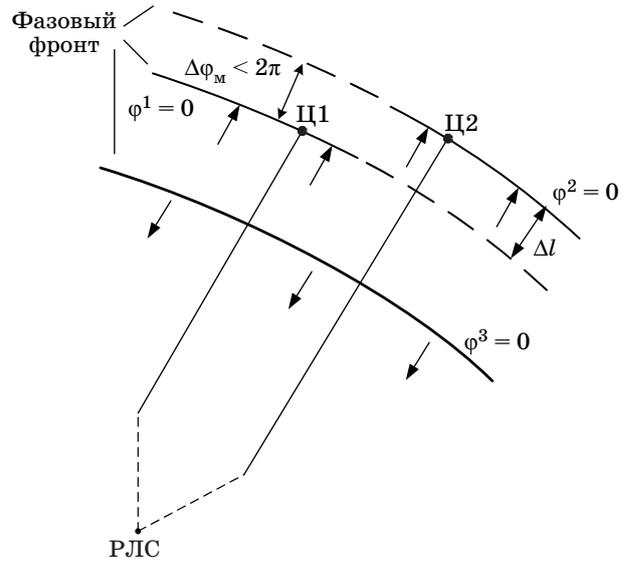
$$s_{\text{прм2}}(t) = \sigma_2(\theta, \psi) U_0 e^{-j(\omega t + \varphi_0 + \alpha)}; \quad (3)$$

$$s_{\Sigma}(t) = s_{\text{прм1}}(t) + s_{\text{прм2}}(t) = \sigma(\theta, \psi) U_0 (e^{-j(\omega t + \varphi_0)} + e^{-j(\omega t + \varphi_0 + \alpha)}) + n(t), \quad (4)$$

где $\sigma(\theta, \psi) = \sigma_1(\theta, \psi) + \sigma_2(\theta, \psi)$ — характеристика рассеяния и поглощения ЭМВ в атмосфере;

$\alpha = \Delta l \frac{4\pi}{\lambda}$ — сдвиг фазы, обусловленный разностью хода ЭМВ за счет пространственного разноса элементов ГВЦ.

Далее производится перестройка фазовращателя на некоторый дискрет фазы $\Delta\varphi$, причем этим сдвигом фазы модулируются только четные импульсы зондирующей последовательности. Полу-



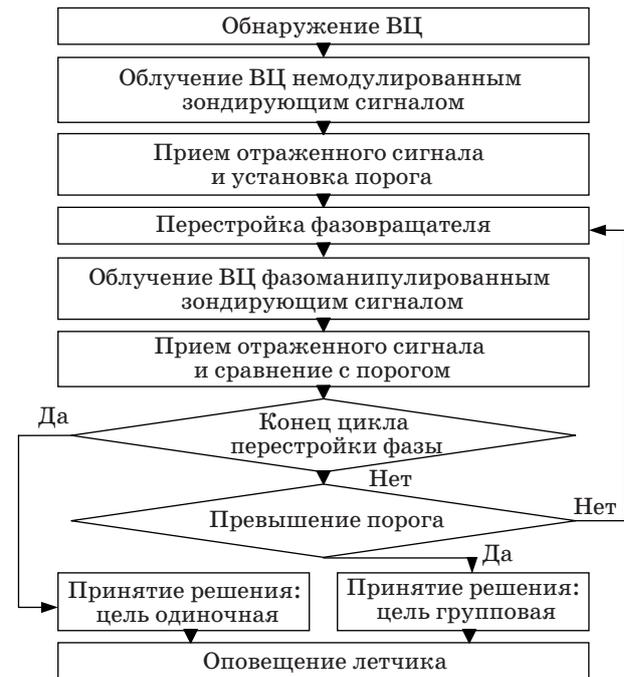
■ Рис. 1. Процесс отражения зондирующего сигнала от элементов ГВЦ

ченным фазоманипулированным сигналом производится облучение цели

$$s_{\text{изл}}(t) = U_0 e^{-j(\omega t + \Delta\varphi a(t) + \varphi_0)}, \quad (5)$$

где $\Delta\varphi$ — величина скачка фазы, вносимого в зондирующий сигнал; $a(t)$ — закон изменения фазы.

Отраженный от воздушной цели сигнал принимается РЛС, и его амплитуда сравнивается с установленным пороговым значением $u_{\text{п}}$:



■ Рис. 2. Алгоритм, реализующий предлагаемый способ радиолокационного разрешения

$$s_{\Sigma}(t) = s_{\text{прм1}}(t) + s_{\text{прм2}}(t) = \sigma(\theta, \psi)U_0 \times (e^{-j(\omega t + \varphi_0 + \Delta\varphi\alpha(t))} + e^{-j(\omega(t+\Delta t) + \varphi_0 + \Delta\varphi\alpha(t+2\Delta t))}), \quad (6)$$

где Δt — время задержки сигнала, отраженного от одного объекта, относительно сигнала, отраженного от другого объекта.

После чего производится проверка на окончание цикла перестройки фазы. Если цикл перестройки окончен и при всех реализациях зондирующего сигнала уровень сигнала не превысил пороговое значение, то принимается решение о том, что цель одиночная. Решение о том, что цель двухэлементная, принимается в случае превышения амплитудой принятого сигнала порогового уровня только при одной реализации зондирующего сигнала и непревышении порогового уровня при остальных реализациях сигнала.

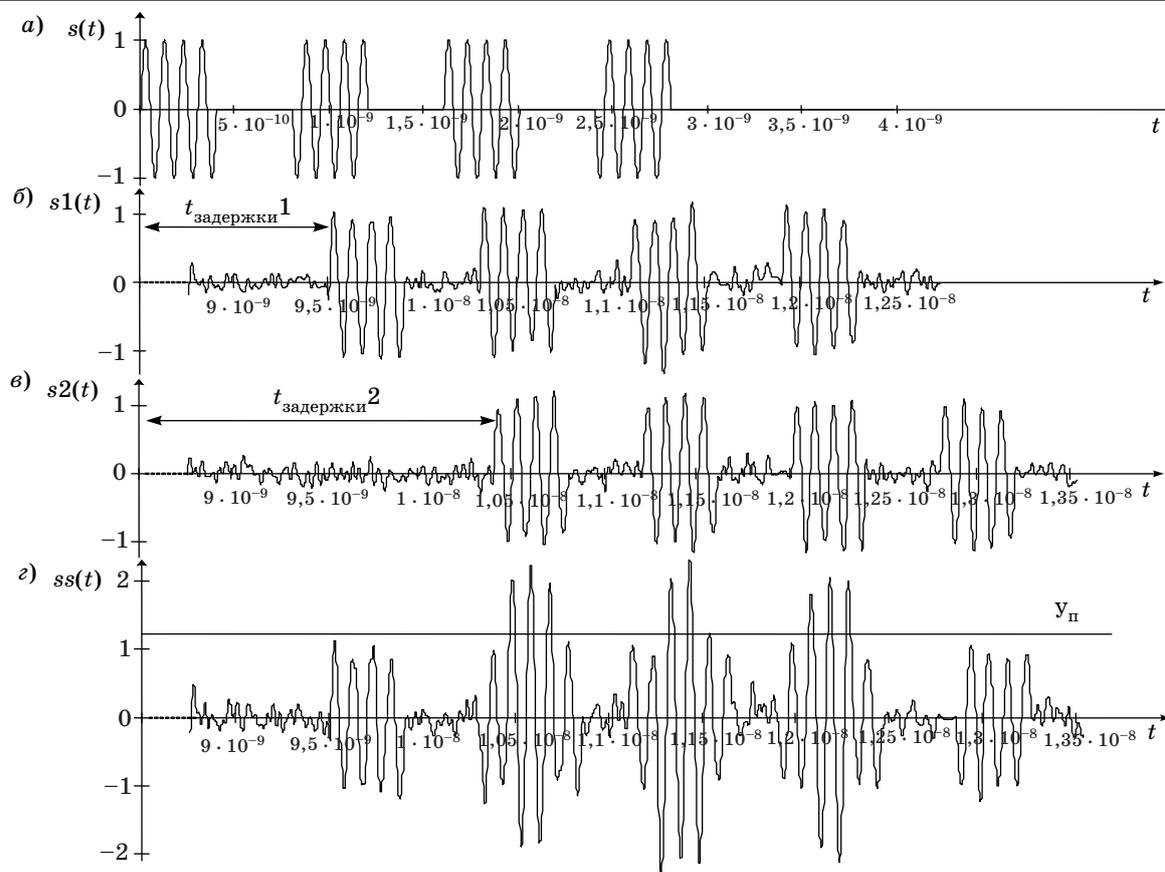
Для синтеза предлагаемого способа была разработана математическая модель процесса отражения зондирующего сигнала сложной структуры от ГВЦ, представленной парой самолетов, находящихся в одном разрешаемом объеме РЛС [2].

Временные диаграммы (рис. 3) характеризуют работу предлагаемого способа.

Следует также отметить, что при математическом моделировании в сигналы, отраженные от ВЦ, была введена естественная помеха (которая может быть обусловлена нестабильностью параметров среды распространения, параметров взаимного перемещения ВЦ, а также внутренними шумами приемника). Причем были сделаны следующие допущения: уровень шумов не превышает 10 % уровня сигналов, отраженных от отдельных объектов в составе ГВЦ; фазовые искажения распределены по равномерному закону, амплитудные — по релеевскому.

Из рисунка видно, что при обеспечении синфазного приема сигналов, отраженных от элементов ГВЦ, уровень суммарного сигнала существенно превышает пороговый уровень $y_{\text{п}}$.

Логическим завершением вышеприведенного алгоритма является оповещение летчика о составе обнаруженной ВЦ, что позволит ему принять решение на групповой воздушный бой и осуществить целераспределение своим истребителям (если их несколько), а также выбрать тактику ведения воздушного боя и определить потребный наряд ракет для одновременного обстрела целей ГВЦ.



■ Рис. 3. Временные диаграммы, характеризующие работу предлагаемого способа: а — зондирующий сигнал; б — отраженный от первой цели сигнал; в — отраженный от второй цели сигнал; г — результирующий сигнал на входе приемника бортовой РЛС

Очевидно, что наличие данной информации об атакуемой ГВЦ на борту истребителя позволит осуществить определенную поддержку решений летчика и оптимизировать наведение ракет на элементы ГВЦ в интересах повышения эффективности борьбы с такими целями.

Заключение

Таким образом, предложенный способ радиолокационного разрешения, основанный на создании в районе ГВЦ фазового фронта электромагнитной волны, обеспечивающего синфазное отражение от ее элементов, может быть использован в задачах разрешения групповых объектов. Предлагаемый алгоритм принципиально позволяет принимать решение о составе ГВЦ, а именно: парная это цель или одиночная, — на основе первичной радиолокационной информации без исполь-

зования данных вторичной обработки. Однако предложенный способ не позволяет оценить число воздушных целей, если в пределах разрешаемого объема РЛС их больше, чем пара.

Литература

1. **Бабич В. К.** Авиация в локальных войнах. — М.: Воениздат, 1988. — 208 с.
2. **Афонин И. Е.** Модель процесса отражения зондирующего сигнала со сложной структурой от групповой воздушной цели // Проблемы совершенствования боевых авиационных комплексов, повышение эффективности их эксплуатации и ремонта: Сб. докл. Всерос. науч.-техн. школы-семинара / СВВАИУ (ВИ). Ставрополь, 2007. С. 8–10.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

При подготовке рукописей статей редакция просит Вас руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов.

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 16 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала в Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее 2 см.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание, полное название организации; заглавие, аннотация (5–7 строк) и ключевые слова на русском и английском языках. Название статьи должно быть кратким, но информативным. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы.

Формулы набирайте в Word, при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте вкладку Define; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = –.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации в текст не заверстываются и предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы изготавливаются в векторных программах: Visio 4, 5, 2002–2003 (*.vsd); Coreldraw (*.cdr); Excel; Word; AdobeIllustrator; AutoCad (*.dxf); Компас; Matlab (экспорт в формат *.ai);

— фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисовочных подписей обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, факс, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40 × 55 мм;

— экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта.

УДК 331.54

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРА

А. И. Краснова,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

П. И. Падерно,

доктор техн. наук, профессор

А. А. Балхарет,

аспирант

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Рассмотрена динамика изменения времени выполнения оператором отдельных операций и задачи в целом в зависимости от изменения напряженности деятельности оператора на примере определенной структуры.

Ключевые слова — оценка, время, напряженность, деятельность.

Для каждого вида деятельности существуют определенные (характерные для него) виды типовых действий и операций, а также соответствующие им структуры, алгоритмы, длительность выполнения, вероятности [1–3] и напряженность.

Напряженность деятельности пользователя (оператора) зависит как от его состояния в данный момент времени (настроения, самочувствия и т. д.), так и от программно-аппаратной реализации процесса выполнения задачи (производительности, организации контроля, удобства интерфейса и т. д.).

В связи с развитием системы открытого образования встает вопрос о повышении эффективности деятельности пользователей (обучаемых), т. е. о совершенствовании процессов приобретения новых знаний, умений и навыков, основанных на использовании современных информационных технологий. Существует ряд педагогических и психологических подходов, направленных на повышение эффективности учебного процесса за счет учета некоторых особенностей пользователей [4]. Эти подходы хотя и позволяют улучшить качество электронных учебников, виртуальных лабораторных работ и другого учебного материала, зачастую не принимают в расчет тот факт, что пользователь не занимается обучением (изучением одного и того же материала) не-

прерывно и, кроме того, имеет свои предпочтения и неприятия определенных материалов.

Рассмотрим достаточно простой пример, иллюстрирующий изменение динамики напряженности деятельности оператора (обучаемого) в случае возможного многократного решения задачи (до успеха).

Оператор выполняет некоторую операцию, после чего результат ее выполнения контролируется (вручную или автоматически). Если контроль признал, что операция выполнена неправильно, то оператор вынужден повторить ее выполнение с самого начала. Неправильное решение задачи может повлиять на напряженность деятельности оператора различным образом: оператор может начать нервничать, что повлечет снижение безошибочности выполнения операций; может начать работать медленнее (аккуратнее с его точки зрения); может начать торопиться и т. д. [5]. При различных технологиях реализации решения задачи напряженность деятельности оператора будет по-разному влиять на его работу и, следовательно, на общее время решения поставленной задачи. Ориентировочная оценка общего времени выполнения задачи на ранней стадии проектирования алгоритма деятельности позволит заранее более детально охарактеризовать деятельность оператора (пользователя) в целом.

Далее рассмотрены четыре частных случая изменения характеристик деятельности оператора, для каждого из которых получены аналитические зависимости для оценки времени решения задачи в целом.

Обозначения:

$\beta_i^1(\beta_i^0)$ — вероятность безошибочного (ошибочного) выполнения рабочей операции на i -м шаге (после i повторений).

T_{p_i} — среднее время выполнения рабочей операции на i -м шаге (после i повторений).

$K_i^{11}(K_i^{10})$ — условная вероятность того, что проверяемая операция при фактически правильном выполнении будет признана правильной (неправильной) на i -м шаге (после i повторений) ($K_i^{11} + K_i^{10} = 1$).

$K_i^{00}(K_i^{01})$ — условная вероятность того, что проверяемая операция при фактически неправильном выполнении будет признана неправильной (правильной) на i -м шаге (после i повторений) ($K_i^{00} + K_i^{01} = 1$).

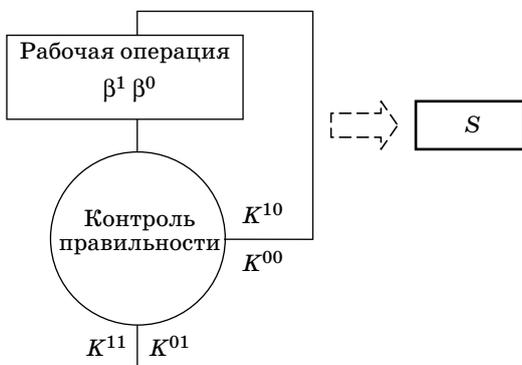
T_{k_i} — среднее время выполнения контроля на i -м шаге (после i повторений).

Типовая функциональная структура (рисунок) может быть сведена к некоторой укрупненной операции S , среднее время выполнения которой определяется по формуле

$$T_S = \sum_{i=1}^{\infty} (A_i + B_i) \left(\sum_{j=1}^i T_j \right) \prod_{j=0}^{i-1} C_j, \quad (1)$$

где $A_i = \beta_i^1 K_i^{11}$; $B_i = \beta_i^0 K_i^{01}$; $C_j = \beta_j^1 K_j^{10} + \beta_j^0 K_j^{00}$; $T_j = T_{p_j} + T_{k_j}$.

Если характеристики деятельности оператора постоянны во времени (отсутствует напряженность, обусловленная ошибками оператора и другими факторами: $\beta_1^1 = \beta_2^1 = \dots = \beta_i^1$, $\beta_1^0 = \beta_2^0 = \dots = \beta_i^0$, $A_1 = A_2 = \dots = A_i$, $B_1 = B_2 = \dots = B_i$, $C_1 = C_2 = \dots = C_i$), что возможно только для опытного оператора, то среднее время выполнения оператором постав-



■ Типовая функциональная структура «Рабочая операция с контролем правильности функционирования»

ленной задачи может быть вычислено по следующей формуле:

$$T_S = \sum_{i=1}^{\infty} T_i C^{i-1}. \quad (2)$$

Рассмотрим некоторые частные случаи.

1. Продолжительность выполнения рабочей и контрольной операций возрастает: $T_{p_1} \leq T_{p_2} \leq \dots \leq T_{p_n}$; $T_{k_1} \leq T_{k_2} \leq \dots \leq T_{k_n}$.

Это наблюдается в случае, когда пользователь завершает задачу, а другой пользователь проверяет правильность ее решения в течение определенного времени. Если задача решена неправильно, то тогда каждый пользователь повторяет процесс. Такое построение делает процесс монотонным и скучным и тем самым обуславливает увеличение времени, необходимого для выполнения задачи и проверки правильности ее решения. Предположим, что изменение (увеличение) длительности выполнения операций экспоненциально, т. е. $T_{p_i} = T_p q^{i-1}$, $T_{k_i} = T_k r^{i-1}$, $q > 1$, $r > 1$, где q^{i-1} — коэффициент, отражающий изменение времени выполнения рабочей операции на i -м шаге (после повторений); r^{i-1} — коэффициент, отражающий изменение времени выполнения контроля на i -м шаге. Тогда среднее время деятельности оператора можно вычислить по формуле

$$T_S = \frac{T_p}{(1-qC)(1-C)} + \frac{T_k}{(1-rC)(1-C)}. \quad (3)$$

2. Увеличивается только время рабочей операции (также экспоненциально), т. е. $T_{p_1} \leq T_{p_2} \leq \dots \leq T_{p_n}$; $T_{k_1} = T_{k_2} = \dots = T_{k_n}$; $T_{p_i} = T_p q^{i-1}$; $T_{k_i} = T_k$, $q > 1$.

Пользователь решает задачу, а контроль правильности решения осуществляется автоматически. Если задача решена неправильно, то пользователь повторяет процесс и испытывает психологическое неудобство (давление), напряженность его деятельности возрастает. Среднее время решения задачи для этого случая может быть вычислено по формуле

$$T_S = \frac{T_p}{(1-qC)(1-C)} + \frac{T_k}{(1-C)^2}. \quad (4)$$

3. Время выполнения и рабочей и контрольной операций уменьшается (так же как и в двух предыдущих случаях — по экспоненциальному закону: $T_{p_1} \geq T_{p_2} \geq \dots \geq T_{p_n}$; $T_{k_1} \geq T_{k_2} \geq \dots \geq T_{k_n}$;

$T_{p_i} = T_p q^{i-1}$; $T_{k_i} = T_k r^{i-1}$, $q < 1$, $r < 1$).

Это наблюдается в ситуации, когда пользователь решает задачу, а компьютер не только обнаруживает ошибку, но и локализует ее. Тогда время, необходимое для выполнения задачи и проверки правильности ее решения, с каждым разом уменьшается. Среднее время длительности реше-

ния оператором задачи может быть вычислено по формуле

$$T_S = \frac{T_p}{(1-q)(1-C)} + \frac{T_k}{(1-r)(1-C)}. \quad (5)$$

4. Уменьшение времени только рабочей операции наблюдается в случае, когда проверка (автоматическая) локализует ошибку, но каждый раз проверяет решение задачи с самого начала, т. е. выполняются следующие соотношения: $T_{p_1} \geq T_{p_2} \geq \dots \geq T_{p_n}$; $T_{k_1} = T_{k_2} = \dots = T_{k_n}$.

Принимая экспоненциальное увеличение скорости выполнения рабочей операции ($T_{p_i} = T_p q^{i-1}$,

$T_{k_i} = T_k$, $q < 1$), можно определить среднее время решения задачи оператором по формуле

$$T_S = \frac{T_p}{(1-q)(1-C)} + \frac{T_k}{(1-C)^2}. \quad (6)$$

Рассмотренный комплекс частных моделей изменения времени выполнения операций дает возможность оценить среднее время выполнения задачи по формулам (3)–(6) в зависимости от построения (организации) процесса дискретной деятельности (в том числе организации учебного процесса при дистанционном обучении).

Литература

1. Адаменко А. Н., Ашеро́в А. Т., Берднико́в И. Л. и др. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: Исследование, проектирование, испытания: Справочник / Под общ. ред. А. И. Губинского и В. Г. Евграфова. — М.: Машиностроение, 1993. — 528 с.
2. Ашеро́в А. Т., Капле́нко С. А., Чубу́к В. В. Эргономика информационных технологий / ХГЭУ. — Харьков, 2000. — 221 с.
3. Дружинин Г. В. Учет свойств человека в моделях технологий. — М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2000. — 327 с.
4. Агапонов С. В., Джалишвили З. О., Кречман Д. Л. и др. Средства дистанционного обучения: Методика, технология, инструментарий / Под ред. З. О. Джалишвили. — СПб.: БХВ-Петербург, 2003. — 336 с.
5. Падерно П. И., Попечителев Е. П. Надежность и эргономика биотехнических систем / Под общ. ред. проф. Е. П. Попечителева. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2007. — 288 с.

НЕБЫВАЛАЯ ПОБЕДА РОССИЙСКОЙ ШКОЛЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ!

21 апреля 2009 г. из Стокгольма пришло замечательное известие: три из четырех золотых медалей в финале студенческого командного чемпионата мира по программированию ACM ICPC завоевали российские команды. Еще никогда наши соотечественники не занимали на одном чемпионате мира первое, третье и четвертое места (см. фото на с. 3 обложки)! Кроме того, еще одна российская команда выиграла серебряные медали, заняв восьмое место. При этом необходимо учесть, что на стадии отборочных соревнований в чемпионате участвовало 7109 команд из 1838 университетов 88 стран мира, а в финале — 100 команд. (<http://cm2prod.baylor.edu/ICPCWiki/attach/staticResources/Factsheet.pdf>)

Общественность начинает привыкать к успехам молодых российских программистов, а они каждый год достигают все лучших результатов.

Первое место, золотые медали и звание чемпионов мира и Европы 2009 года получили Максим Буздалов, Евгений Капун и Владислав Исенбаев — студенты Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО). Тренер команды и руководитель те же, что и все предыдущие годы, — Андрей Станкевич и Владимир Глебович Парфенов. Ребята решили 9 из 11 задач со штрафным временем 1381 минута.

Команда СПбГУ ИТМО стала чемпионом мира в третий раз (до этого в 2004 и 2008 гг.), догнав команду Стэнфордского университета, которая также побеждала трижды (на турнире в 1985 и 1987 гг. и в 1991 г. на чемпионате мира по программированию). По два раза чемпионами мира были команды шести университетов, включая Санкт-Петербургский государственный университет. (http://en.wikipedia.org/wiki/ACM_International_Collegiate_Programming_Contest)

Команда университета Тсингхуа (Китай) заняла второе место, получила золотые медали и стала чемпионом Азии, решив также 9 задач, но с большим штрафным временем — 1800 минут.

Олег Давыдов, Юрий Петров и Сергей Копелиович — члены команды Санкт-Петербургского государственного университета — получили золотые медали, заняв третье место. Тренер и руководитель — двукратный чемпион мира Андрей Лопатин. Команда решила 8 задач со штрафным временем 1176 минут.

Четвертое место завоевала команда Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского. Награждены золотыми медалями Станислав Пак, Наталья Бондаренко и Дмитрий Матов. Тренеры команды — Михаил Мирзаянов и Виталий Гольдштейн. Руководитель — Антонина Гавриловна Федорова. Эта команда также решила 8 задач, но со штрафным временем 1305 минут.

За места с пятого по восьмое команды награждены серебряными медалями.

На пятом месте команда Оксфордского университета. На шестом — еще одна команда из Китая — команда университета Жейянг. На седьмом — команда одного из самых известных университетов мира — Массачусетского технологического института (США), ставшая чемпионом Северной Америки.

На восьмом месте команда Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова (Барнаул). В ее составе — Алексей Избышев, Максим Колосовский, Андрей Акиншин. Тренер команды — Елена Николаевна Крючкова. Руководитель — Семен Аврамович Кантор.

Все эти команды решили по 7 задач, но с разным штрафным временем.

Столько же решила команда Варшавского университета (Польша), получившая бронзовые медали.

По шесть задач решили следующие команды, также награжденные бронзовыми медалями: университет Ватерлоо (Канада), Тбилисский государственный университет (Грузия), университет Карнеги—Меллона (США) и Южно-Китайский технологический университет (Китай).

Отметим также, что в этом году решением оргкомитета ACM ICPC ежегодная премия *DeBlasi Award* 2009 года за большой вклад в развитие соревнований ICPC вручена СПбГУ ИТМО: ректору, профессору В. Н. Васильеву; директору NEERC, профессору В. Г. Парфенову и председателю жюри NEERC Р. А. Елизарову.

Поздравляем победителей и желаем таких же успехов другим россиянам!

Команда СПбГУ ИТМО победила благодаря не только помощи руководства университета, но и материальной поддержке подготовки команды рядом компаний в рамках движения «Сохраним в университетах лучших!» (<http://savethebest.ru/>). Мы признательны группе компаний «Транзас» (<http://www.transas.ru/company/>) (президент — Николай Лебедев), ООО «Скартел» (<http://www.yota.ru/ru/info/>) (генеральный директор — Денис Свердлов), JetBrains (<http://www.jetbrains.com>) (генеральный директор — Сергей Дмитриев) и компании «ДевиноСМС» (<http://www.devinosms.com/>) (исполнительный директор — Павел Ушанов).

*А. А. Шальто — доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологий программирования СПбГУ ИТМО;
Ф. Н. Царев — чемпион мира по программированию 2008 года, магистрант кафедры компьютерных технологий СПбГУ ИТМО*

- *Рис. 1. Чемпион мира команда СПбГУ ИТМО с организаторами соревнований*



- *Рис. 2. Команда СПбГУ и директор соревнований ACM ICPC Билл Пучер (справа)*



- *Рис. 3. Команда Саратовского ГУ, занявшая 4-е место (крайний справа Билл Пучер)*



- *Рис. 4. Команда Алтайского ГТУ с директором чемпионата (справа)*



- *Рис. 5. Лауреаты премии DeBlasi Award и организаторы ACM ICPC (крайние слева и справа)*



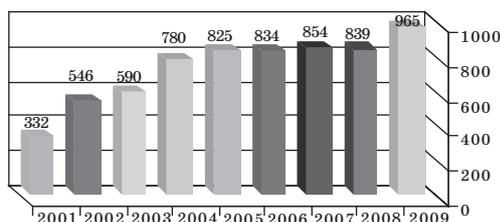
XII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ DATE 2009

20–24 апреля 2009 года в Ницце (Франция), в выставочном комплексе Асгополис с успехом прошла двенадцатая международная конференция DATE 2009 (Design Automation and Test in Europe). Крупнейшая в Европе конференция, сопровождаемая выставкой, объединила академических исследователей, разработчиков, продавцов и пользователей в области автоматизации проектирования, тестирования электронных схем и систем. Программа конференции состояла из 77 секций, включая 15 специализированных, посвященных вопросам методологии проектирования микроэлектронных систем, тестирования и верификации проектных решений, применению готовых проектов в различных областях микроэлектроники и радиоэлектроники, проблемам разработки программных средств САПР, разработке и внедрению встраиваемого программного обеспечения. Особое внимание было уделено представлению успешных проектов, выполненных в виде систем на кристалле, новым разработкам многоядерных процессорных устройств и их применению, преимущественно в беспроводных средствах связи.

На форум 2009 года было прислано 965 докладов (рис. 1), что на 15 % больше, чем в 2008 году. Из них были отобраны 277 лучших. В конференции приняли участие специалисты более чем из 70 стран мира, что свидетельствует о ее высочайшем рейтинге.

Основная программа началась 21 апреля с церемонии открытия конференции генеральным председателем Технического комитета DATE 2009, профессором Люкой Бенини (Luca Benini), Университет Болоньи, Италия. На первой сессии конференции был представлен обзорный доклад главного технического директора компании ARM Майка Мюллера (Mike Muller), посвященный 25-летию опыта ведущих мировых разработчиков микроэлектронных схем и современным тенденциям развития микроэлектроники, а также доклад Джозефа Сифакиса (Joseph Sifakis), Национальный центр научных исследований Франции, посвященный научно-техническим достижениям в проектировании встраиваемых систем, их функциональности, производительности и стоимости.

Одиннадцать учебно-практических курсов, прошедших в день открытия конференции, в основном



■ Рис. 1. Доклады, присланные на DATE 2009



были посвящены вопросам проектирования, анализа и синтеза многопроцессорных встраиваемых систем, новым тенденциям и направлениям в проектировании микромоощных ИС, проблемам тестирования и самонастройки аналого-цифровых радиочастотных схем и систем.

С 21 по 23 апреля прошли основные секции конференции: по широчайшему кругу вопросов проектирования ИС; системной интеграции микроэлектронных схем, систем и устройств; разработки средств САПР; технических решений для субмикронных проектов; тестированию проектных решений и т. д.

В последний день конференции были проведены восемь семинаров, посвященных проблемам разработки архитектурных и технологических решений для сетей на кристалле, микромоощным ИС, разработке программных средств САПР, глобальным асинхронным и локальным синхронным системам и др.

Большинство докладов, как обычно, были представлены участниками из стран Западной Европы, а также США и Канады (рис. 2).

В выставке приняли участие более 60 ведущих мировых микроэлектронных компаний



■ Рис. 2. Состав участников конференции

и компаний-разработчиков САПР, а также ряд небольших компаний и университетских групп, предлагающих уникальные новые продукты и разработки. Выставка DATE пользуется большой популярностью. Число ее фирм-экспонентов и посетителей растет год от года. В этом году общее число участников конференции и посетителей выставки превысило 2400. Это наглядно подтверждает тот факт, что DATE является не просто обычной европейской конференцией по проблемам САПР и проектирования ИС, а научным событием мирового масштаба.

Приглашаю ученых и разработчиков микроэлектронной аппаратуры России к участию в следующей конференции и выставке, которая должна состояться 8–12 марта 2010 г. в Дрездене (Германия), www.date-conference.com

По всем вопросам обращаться по адресу: 124681, Москва, Советская ул., д. 3, Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (ИППМ РАН), тел./факс. (499) 729-9208.

*А. Л. Стемпковский,
член комитета спонсоров DATE,
директор ИППМ РАН, академик РАН*

Филиал Кемеровского государственного университета в г. Анжеро-Судженске
Томский государственный университет
Кемеровский государственный университет
Кемеровский научный центр СО РАН
Институт вычислительных технологий СО РАН

VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ
«ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ»
(ИТММ-2009)
13–14 ноября 2009 г.

Место проведения: Филиал Кемеровского государственного университета в г. Анжеро-Судженске
Адрес: 652470, Кемеровская область, г. Анжеро-Судженск, ул. Ленина, 8.

Цель конференции

Обсуждение достижений в области информационных технологий и математического моделирования.

Поиск путей интеграции научных знаний и практики.

Определение актуальных и перспективных направлений научных исследований и практических разработок.

Привлечение молодых исследователей к научному творчеству.

Формы проведения конференции

Пленарные и секционные доклады.

Дискуссии на секциях.

Круглые столы.

В рамках конференции будет проведен конкурс научных докладов студентов, аспирантов и молодых ученых.

Направления работы конференции

Математическое моделирование в научных исследованиях.

Информационные технологии в математических исследованиях.

Новые информационные технологии — достижения и перспективы.

Пакеты прикладных программ и их применение в математическом моделировании.

Численные методы и имитационное моделирование.

Моделирование телекоммуникационных сетей и систем массового обслуживания.

Геоинформационные системы и их применение.

Применение Web-технологий для научных исследований и учебного процесса.

Технологии создания электронных информационных и учебных изданий.

Применение информационных технологий и математического моделирования:

— в технике, естествознании, экологии;

— в экономике и управлении;

— в психологии, образовании, гуманитарных науках;

— в медицине, физической культуре и спорте.

Вопросы методики преподавания дисциплин в области информационных технологий и математического моделирования.

Повышение качества подготовки специалистов в области информационных технологий и математического моделирования.

Методологическое и социокультурное значение математического моделирования и информатизации.

Издание трудов

К открытию конференции планируется издать сборник материалов конференции, в который будут включены тезисы докладов авторов, оформленные строго в соответствии с прилагаемыми требованиями и содержащие новые научные или практические результаты.

Публикация тезисов доклада для иногородних участников — 120 руб. за 1 стр. формата А4.

Контрольные сроки

Желающие принять участие в работе конференции должны в срок до 5 октября 2009 г. направить в адрес оргкомитета следующие материалы:

— заявку на участие в конференции;

— электронный вариант материалов доклада, оформленный в соответствии с требованиями;

— для иногородних участников копию платежного поручения.

Дополнительная информация и справки

Организационный комитет конференции:
Филиал КемГУ в г. Анжеро-Судженске, Организационно-технический отдел,

652470, Кемеровская область, г. Анжеро-Судженск, ул. Ленина, 8.

Вечер Е. В. — и. о. директора филиала КемГУ в г. Анжеро-Судженске.

Гарайшина И. Р. — заместитель директора по научной работе.

Вавилов В. А. — начальник организационно-технического отдела.

Эл. адрес: conf@asf.ru

Телефоны: (38453) 6-41-05, 6-28-92.

Факс: (38453) 6-18-79.

АЛИЕВ
Элчин
Рашид оглы



Гражданин Азербайджана. Старший научный сотрудник, заведующий лабораторией Института кибернетики Национальной академии наук Азербайджана. В 1985 году окончил Азербайджанскую государственную нефтяную академию. В 1995 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 38 научных публикаций. Область научных интересов — компьютерные сети, телекоммуникационные средства и нечеткая логика.
Эл. адрес: elchin@sinam.net

АРТЕМЕНКО
Юрий
Николаевич



Заведующий отделом проектирования и координации работ Физического института им. П. Н. Лебедева РАН. В 1975 году окончил Московский авиационный институт по специальности «Производство летательных аппаратов». В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций и двух запатентованных изобретений. Область научных интересов — методы математического моделирования, оценивания и управления механическими системами, антенные системы и комплексы для решения радионавигационных задач.
Эл. почта: feli@asc.rssi.ru

АСТАФУРОВ
Артем
Александрович



Аспирант кафедры компьютерных технологий Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, старший вице-президент компании «DataArt». В 2006 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики. Является автором трех научных публикаций. Область научных интересов — современные языки программирования, объектно-ориентированное программирование и дизайн, аспектно-ориентированное и автоматное программирование, инженерия программного обеспечения.
Эл. адрес: astaff@dataart.com

АФОНИН
Илья
Евгеньевич



Адъюнкт кафедры эксплуатации и ремонта бортового авиационного радиоэлектронного оборудования (радионавигации и радиосвязи) Ставропольского высшего военного авиационного инженерного училища (военного института) им. маршала авиации В. А. Судца. В 2004 году окончил Ставропольский филиал военно-воздушной инженерной академии им. Н. Е. Жуковского. Является автором более 15 научных публикаций. Область научных интересов — исследование вопросов радиолокационного разрешения групповых воздушных целей.
Эл. адрес: ilyaafonin@yandex.ru

БАЖЕНОВ
Анатолий
Вячеславович



Профессор, начальник кафедры эксплуатации и ремонта бортового авиационного радиоэлектронного оборудования (радионавигации и радиосвязи) Ставропольского высшего военного авиационного инженерного училища (военного института) им. маршала авиации В. А. Судца. В 1983 году окончил Даугавпилсское высшее военное авиационное инженерное училище им. Я. Фабрициуса. В 1990 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций. Область научных интересов — цифровая обработка сигналов, радиолокация.
Эл. адрес: a_bazhenov61@rambler.ru

БАЛХАРЕТ
Ахмед
Абдулла Саид



Гражданин Йемена. Аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». В 2006 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» по специальности «Информатика и вычислительная техника». Является автором трех научных публикаций. Область научных интересов — автоматизированные системы поддержки принятия решений, профессиональный отбор, оценка деятельности.
Эл. адрес: balhareth_ru@yahoo.com

**БЕЛОБОРОДОВА
Наталья
Андреевна**



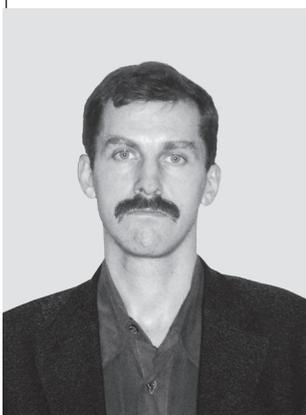
Профессор, заведующая кафедрой информационных технологий Института управления, информации и бизнеса (г. Ухта). В 1976 году окончила Ухтинский индустриальный институт. В 2003 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата экономических наук по специальности «Управление народным хозяйством». Является автором 50 научных публикаций, в том числе двух монографий. Область научных интересов — интеллектуальные информационные технологии управления, моделирование социально-экономических процессов, проектирование информационных систем. Эл. адрес: velbest@mail.ru

**БЕСТУГИН
Александр
Роальдович**



Доцент кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1982 году окончил математико-механический факультет Ленинградского государственного университета им. А. А. Жданова. В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций и соавтором одной монографии. Область научных интересов — системы управления и связи. Эл. адрес: zlata@aanet.ru

**ВАСИЛЬЕВ
Алексей
Евгеньевич**



Доцент кафедры автоматики и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. В 1998 году окончил Санкт-Петербургский государственный технический университет по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных и методических публикаций. Область научных интересов — встраиваемые микропроцессорные и микроконтроллерные системы интеллектуального управления и инструментальные средства их разработки. Эл. адрес: avasil@aivt.ftk.spbstu.ru

**ГОРОДЕЦКИЙ
Андрей
Емельянович**



Доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией методов и средств автоматизации Института проблем машиноведения РАН, заслуженный деятель науки и техники. В 1965 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина. В 1993 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 150 научных публикаций и 70 изобретений. Область научных интересов — математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика. Эл. адрес: gorodetsky@mail23.ipme.ru

**ДЕРНОВА
Евгения
Сергеевна**



Аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». В 2007 году окончила Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ». Является автором 17 научных публикаций и трех изобретений. Область научных интересов — вычислительно сложные задачи для криптографических протоколов и алгоритмов. Эл. адрес: evgeshka19@mail.ru

**ДОРОШЕНКО
Максим
Сергеевич**



Младший научный сотрудник лаборатории методов и средств автоматизации Института проблем машиноведения РАН. В 2009 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и управление в технических системах». Является автором двух научных публикаций. Область научных интересов — пористый кремний, информационные системы. Эл. почта: m.s.doroshenko@gmail.com

ДУБАРЕНКО
Владимир
Васильевич



Ученый секретарь Института проблем машиноведения РАН. В 1963 году окончил Ленинградский Военно-механический институт по специальности «Механика», в 1965 году — по специальности «Системы управления». В 2002 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 70 научных публикаций. Область научных интересов — интеллектуальные системы и системы управления. Эл. адрес: dvv@msa.impe.ru

КРАСНОВА
Анастасия
Ивановна



Доцент кафедры радиоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2000 году окончила Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления». В 2005 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 30 научных публикаций и одного запатентованного изобретения. Область научных интересов — системы баз знаний и данных, системы поддержки принятия решений, экспертные системы. Эл. адрес: aikrasnova@mail.ru

КУЧМИН
Андрей
Юрьевич



Старший научный сотрудник лаборатории механики управляемых систем Института проблем машиноведения Российской академии наук. В 2005 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 20 научных публикаций и двух запатентованных изобретений. Область научных интересов — математическое моделирование в естественных науках, искусственный интеллект и принятие решений, математические проблемы теории управления и др. Эл. почта: radiotelescope@yandex.ru

КОСТИНА
Анна
Александровна



Аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». В 2007 году окончила Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ». Является автором девяти научных публикаций и трех изобретений. Область научных интересов — аутентификация информации в компьютерных системах. Эл. адрес: spectrz@mail.ru

КРИУШОВ
Алексей
Вячеславович



Старший преподаватель кафедры автоматики и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. В 2004 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Автоматика и управление в технических системах». Является автором более 20 научных публикаций. Область научных интересов — встраиваемые интеллектуальные системы управления. Эл. адрес: spb_kav@rambler.ru

МОЛДОВЯН
Николай
Андреевич



Главный научный сотрудник ФГУП НИИ «Вектор», заслуженный изобретатель Российской Федерации, профессор. В 1975 году окончил Кишиневский политехнический институт по специальности «Полупроводниковые приборы». В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 200 научных публикаций и 50 запатентованных изобретений. Область научных интересов — информационная безопасность, криптография. Эл. адрес: nmold@mail.ru

МОЛДОВЯНУ

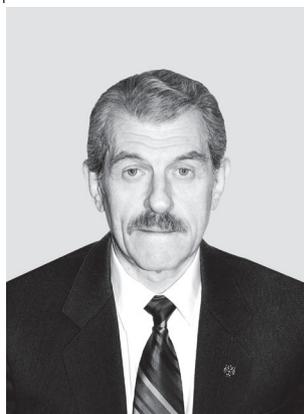
**Петр
Андреевич**



Начальник службы главного метролога ФГУП НИИ «Вектор». В 1980 году окончил Ленинградский технологический институт им. Ленсовета по специальности «Автоматизация технологических процессов». В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 40 научных публикаций и пяти изобретений. Область научных интересов — информационная безопасность. Эл. адрес: spectrz@mail.ru

ПАДЕРНО

**Павел
Иосифович**



Профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», заслуженный деятель науки РФ. В 1969 году окончил математико-механический факультет Ленинградского государственного университета. В 1998 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 150 научных публикаций. Область научных интересов — методы оценки и оптимизации человеко-машинных систем. Эл. адрес: pipaderno@list.ru

РЗАЕВ

**Рамин
Рза оглы**



Гражданин Азербайджана. Доцент, ведущий научный сотрудник Института кибернетики Национальной академии наук Азербайджана. В 1984 году окончил Бакинский государственный университет по специальности «Математика». В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Является автором более 40 научных публикаций, одного учебного пособия и двух монографий. Область научных интересов — Soft Computing-технология, включая нечеткую логику, теорию нейронных сетей и теорию хаоса. Эл. адрес: raminrza@yahoo.com

САВИЩЕНКО

**Николай
Васильевич**



Профессор Военной академии связи. В 1986 году окончил Новосибирский государственный университет, в 1989 году — Военную академию связи. В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 95 научных публикаций. Область научных интересов — математическое моделирование каналов связи, помехоустойчивость сигналов, многомерные сигнальные конструкции. Эл. адрес: snikaspb@mail.ru

ТИМОФЕЕВ

**Кирилл
Иванович**



Системный архитектор компании «DataArt». В 2007 году окончил бакалавриат Ижевского государственного технического университета, в 2009 году — магистратуру кафедры компьютерных технологий Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. Является автором двух научных публикаций. Область научных интересов — современные языки программирования, динамическое и функциональное программирование, объектно-автоматное программирование, масштабируемые и распределенные системы. Эл. адрес: timofeev.kirill@gmail.com

ШАЛЫТО

**Анатолий
Абрамович**



Заведующий кафедрой технологий программирования Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. Ученый секретарь НПО «Аврора». В 1971 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика». В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 250 научных публикаций, трех монографий и 70 изобретений. Область научных интересов — системы логического управления, автоматное программирование. Эл. адрес: shalyto@mail.ifmo.ru

ШАТАЛОВА
Валентина
Александровна



Старший преподаватель кафедры антенн и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2000 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. В 2003 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 30 научных публикаций. Область научных интересов — математика, локация, связь, цифровая обработка информации.

ШИЛОВ
Максим
Михайлович



Старший преподаватель кафедры автоматики и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. В 2003 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Автоматика и управление в технических системах». Является автором более 30 научных публикаций и трех патентов. Область научных интересов — встраиваемые интеллектуальные системы управления. Эл. адрес: shilov78@mail.ru

ШЕРЕМЕТОВ
Леонид
Борисович



Старший научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. В 1982 году окончил Ленинградский кораблестроительный институт по специальности «Приборостроение». В 1990 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 250 научных публикаций. Область научных интересов — многоагентные системы, гибридные интеллектуальные системы, поиск данных и архитектуры, ориентированные на семантические сервисы. Эл. адрес: lsheremetov@mail.ru

УДК 629.735.33

Проблемы обработки и передачи информации в локальной вычислительной сети системы управления радиотелескопа

Артеменко Ю. Н., Городецкий А. Е., Дубаренко В. В., Дорошенко М. С., Кучмин А. Ю. Информационно-управляющие системы, 2009. № 4. С. 2–8.

Рассматриваются возможные варианты архитектуры локальной вычислительной сети для реализации алгоритмов управления зеркальной системы крупного полноповоротного радиотелескопа миллиметрового диапазона радиоволн.

Ключевые слова — радиотелескоп, система управления, локально-вычислительная сеть, системы реального времени.

Список лит.: 4 назв.

УДК 621.391

Статистические характеристики многомерных адаптивных фильтров-ортогонализаторов

Бестугин А. Р., Шаталова В. А. Информационно-управляющие системы, 2009. № 4. С. 9–12.

Предложены адаптивные алгоритмы подстройки весовых коэффициентов многомерных фильтров-ортогонализаторов, выполняющих ортогонализацию компонент входного векторного случайного процесса методами прямых вычислений. Получено аналитическое выражение совместной плотности распределения вероятностей выборочных оценок дисперсий выходных напряжений многомерных адаптивных фильтров-ортогонализаторов.

Ключевые слова — ортогонализация, адаптивный алгоритм, статистические характеристики.

Список лит.: 5 назв.

УДК 62-519

Децентрализованное управление адаптивными сетями поставок на основе теории коллективного интеллекта и агентной технологии. Часть 1: Модель сети поставок

Шереметов Л. В. Информационно-управляющие системы, 2009. № 4. С. 13–20.

Приводится один из подходов к децентрализованному управлению сетями поставок, основанный на концепциях коллективного интеллекта и многоагентных системах. Построена модель сети поставок. Для оптимального управления потоками в условиях неопределенной среды на локальном уровне использованы алгоритмы стимулируемого обучения, а для оптимизации глобального поведения сети предложен алгоритм двойной Q-маршрутизации.

Ключевые слова — сети поставок, многоагентная система, теория коллективного интеллекта, стимулируемое обучение.

Список лит.: 21 назв.

УДК 629.735.33

Data processing and data transfer problems in the local area network of a radio telescope control system

Artemenko Yu. N., Gorodetskiy A. E., Dubarenko V. V., Doroshenko M. S., Kuchmin A. Yu. IUS, 2009. N 4. P. 2–8.

Several possible variants of local area network architecture for the implementation of the radio telescope pointing algorithm are discussed in this article.

Keywords — radio telescope, control system, local area network, real time systems.

Refs: 4 titles.

УДК 621.391

The statistical characteristics of multidimensional adaptive filters-orthogonalizers

Bestugin A. R., Shatalova V. A. IUS, 2009. N 4. P. 9–12.

Adaptive algorithms of multidimensional filters orthogonalizers weight coefficients adjustment which can execute the orthogonalization of entering array stochastic process components by the direct calculations methods are suggested. An analytical expression of joint probability density function of sampled estimate dispersions of multidimensional adaptive filters orthogonalizers output voltages is received.

Keywords — orthogonalization, adaptive algorithm, stochastic characteristics.

Refs: 5 titles.

УДК 62-519

Decentralized control of adaptive supply networks based on collective intelligence and agent technologies. Part 1: Supply network model

Sheremetov L. B. IUS, 2009. N 4. P. 13–20.

An approach to decentralized control of supply networks based on the collective intelligence theory and multi agent systems is proposed. A model of the supply network is created. For optimal control of the flows in uncertain environment reinforcement learning algorithms are used at the local level, while generalization of the Q-dual-learning algorithm is proposed to optimize the global behavior.

Keywords — supply network, multi agent system, collective intelligence theory, reinforcement learning.

Refs: 21 titles.

УДК 681.3.06

Наследование автоматных классов с использованием динамических языков программирования (на примере языка RUBY)

Тимофеев К. И., Астафуров А. А., Шалыто А. А. Информационно-управляющие системы, 2009. № 4. С. 21–25.

Рассматриваются достоинства применения динамических языков программирования для реализации наследования автоматных классов. Предлагаемый подход иллюстрируется примером реализации функциональности регистрации пользователей на сайте.

Ключевые слова — объектно-автоматное программирование, наследование автоматных классов, динамические языки программирования.

Список лит.: 8 назв.

УДК 681.3

Гомоморфизм конечных групп векторов малой размерности и синтез схем цифровой подписи

Молдовяну П. А., Молдовян Н. А., Дернава Е. С., Костина А. А. Информационно-управляющие системы, 2009. № 4. С. 26–32.

Описывается гомоморфное отображение мультипликативной конечной группы векторов в мультипликативную группу конечного поля, над которым они заданы. Установленный гомоморфизм имеет значение для криптоанализа алгоритмов электронной цифровой подписи на основе сложности задачи дискретного логарифмирования в циклических подгруппах нециклической группы векторов. Предложен алгоритм электронной цифровой подписи, в котором учитывается наличие установленного гомоморфизма.

Ключевые слова — векторное пространство, гомоморфизм, конечные группы, многомерная циклическая группа, цифровая подпись.

Список лит.: 7 назв.

УДК 621.39

Помехоустойчивость когерентного приема сигналов двоичной амплитудно-фазовой модуляции при неидеальной синхронизации (Часть 2)

Савищенко Н. В. Информационно-управляющие системы, 2009. № 4. С. 33–42.

Предлагается методика оценки потерь в мощности и помехоустойчивости когерентного приема сигналов при наличии ошибки в определении фазы несущей. Приведены основные соотношения для расчета помехоустойчивости когерентного приема двоичных сигналов амплитудно-фазовой модуляции с произвольным расположением сигнальных точек на плоскости, неравными энергиями и неравновероятной априорной вероятностью передачи сигналов при наличии ошибки сопровождения фазы.

Ключевые слова — помехоустойчивость, когерентный прием, неидеальная синхронизация, сигналы амплитудно-фазовой модуляции.

Список лит.: 11 назв.

УДК 681.3.06

Automata classes inheritance with dynamical languages (with examples in RUBY)

Timofeev K. I., Astafurov A. A., Shalyto A. A. IUS, 2009. N 4. P. 21–25.

This article examines the merits of using dynamic programming languages for implementing inheritance automata-based classes. The suggested approach is illustrated by an example of implementing users registration's functionality on a website.

Keywords — object automata programming, automata classes inheritance, dynamical languages.

Refs: 8 titles.

УДК 681.3

Homomorphism of the finite groups of small dimension vectors and synthesis of the digital signature schemes

Moldovyanu P. A., Moldovyan N. A., Dernaeva E. S., Kostina A. A. IUS, 2009. N 4. P. 26–32.

Homomorphism of the multiplicative finite vector group in the finite field over which the vectors are defined is described. The homomorphism is formally proved for the dimension values of 2, 3, and 4. It is experimentally demonstrated that the homomorphism takes place also in the case of the large dimension values. It is proposed that the hypothesis of the homomorphism takes place for all cases of the dimension values, while the defined operation of the vector multiplication is commutative and associative. The homomorphism is taken into account in the proposed digital signature algorithm based on the difficulty of finding discrete logarithm in the non-cyclic vector groups.

Keywords — vector space, homomorphism, finite groups, multidimensional cycling, digital signature.

Refs: 7 titles.

УДК 621.39

Interference immunity of coherent reception of double amplitude-phase modulation (apm) signals with non-ideal synchronization (Part 2)

Savishchenko N. V. IUS, 2009. N 4. P. 33–42.

A procedure of loss estimation in power and interference immunity of signal coherent reception with error presence in carrier phase definition is suggested. Main correlation factors for the design of interference immunity of coherent reception of double amplitude-phase modulation signals with arbitrary arrangement of signals points on the plane, non-equal energies and non-probable a priori probability of signal transmission at the error presence tracking are given.

Keywords — interference immunity, coherent reception, non-ideal synchronization, amplitude-phase modulation signals.

Refs: 11 titles.

УДК 004.89

Инструментальные средства и методология подготовки специалистов в области встраиваемых интеллектуальных систем управления

Васильев А. Е., Кривошов А. В., Шилов М. М. Информационно-управляющие системы, 2009. № 4. С. 43–52.

Рассматриваются особенности построения, обобщенная структура встраиваемых интеллектуальных систем управления и проблемы подготовки квалифицированных специалистов в этой области. Описаны организация и используемые программно-аппаратные средства лаборатории встраиваемых интеллектуальных систем управления.

Ключевые слова — встраиваемая интеллектуальная система управления, нечеткий регулятор, система технического зрения, многозвенное манипуляционное устройство, супервизорное управление.

Список лит.: 8 назв.

УДК 681.3.06

Генетический алгоритм поиска оптимального варианта роста производства в экономике муниципального образования

Белобородова Н. А. Информационно-управляющие системы, 2009. № 4. С. 53–58.

Рассматривается проблема усиления потенциала прогнозирования роста производства в экономике муниципального образования. Предлагаемая технология расчетов с использованием генетического алгоритма позволяет объективно решать задачи анализа факторов, обуславливающих рост производства в конкретном анализируемом периоде, определять оптимальные варианты этого роста с учетом выпуска основных видов продукции.

Ключевые слова — механизм управления, экономика муниципального образования, факторы роста производства, генетические алгоритмы.

Список лит.: 11 назв.

УДК 330.43

Агрегированная оценка работы служащих компании методом нечеткого вывода

Рзаев Р. Р., Алиев Э. Р. Информационно-управляющие системы, 2009. № 4. С. 59–67.

Рассматривается задача оперативной оценки работы персонала в компаниях. Соответствующая информационная база данных формируется и периодически обновляется на основе предлагаемой схемы оценки профессиональных качеств. В результате применения метода нечеткого логического вывода синтезируются электронные «портреты» сотрудников компании и устанавливаются тренды их профессионального роста за отчетные периоды.

Ключевые слова — лингвистическая переменная, нечеткое множество, нечеткая импликация, нечеткое отношение.

Список лит.: 4 назв.

УДК 004.89

The development tools and methodology of specialist training in embedded intelligence control system design

Vassiliev A. E., Kriushov A. V., Shilov M. M. IUS, 2009. N 4. P. 43–52.

The specifics of embedded intelligence control system design, its generalized structure and the problem of specialist training in this area are discussed. The embedded intelligence control system of the laboratory and the hardware-software solutions exploited are also described.

Keywords — embedded intelligence control system, fuzzy regulator, machine vision system, multi joint manipulator, supervisory control.

Refs: 8 titles.

УДК 681.3.06

A genetic algorithm to seek the optimum variant of growth of manufacturing in the economy of a municipal unit

Beloborodova N. A. IUS, 2009. N 4. P. 53–58.

The problem of strengthening the potential of the forecasting of the growth of manufacturing in the economy of a municipal unit is considered. The technology of calculations with the use of a genetic algorithm allows to solve the objective tasks of the analysis of the factors determining the growth of manufacturing in the particular analyzed period, to define the optimum variants of this growth considering the release of the basic production items.

Keywords — control mechanics, economy of municipal education, factors of manufacturing growth, genetic algorithms.

Refs: 11 titles.

УДК 330.43

Aggregate estimation of the company employees activities by the fuzzy conclusion method

Rzayev R. R., Aliyev E. R. IUS, 2009. N 4. P. 59–67.

The problem of operative performance rating of the personnel in the companies is considered. Accordingly, an information database is formed and is periodically updated based on the offered scheme of an estimation of professional qualities. By application of the fuzzy logic conclusion method the electronic «portraits» of the employees of a company are synthesised and the trends of their professional growth for the reporting periods are determined.

Keywords — linguistic variable, fuzzy set, fuzzy implication, fuzzy relation.

Refs: 4 titles.

УДК 621.396.969.34:629.735

Способ радиолокационного разрешения групповой воздушной цели

Баженов А. В., Афонин И. Е. Информационно-управляющие системы, 2009. № 4. С. 68–71.

Предложен способ радиолокационного разрешения групповой воздушной цели по характеру отклика на зондирующие сигналы сложной структуры. Приведен алгоритм разрешения, реализующий этот способ.

Ключевые слова — радиолокационное разрешение, групповая воздушная цель, сигналы сложной структуры, фазоманипулированный сигнал, бортовая радиолокационная станция.

Список лит.: 2 назв.

УДК 331.54

Модель оценки времени выполнения задачи в зависимости от изменения напряженности деятельности оператора

Краснова А. И., Падерно П. И., Балхарет А. А. Информационно-управляющие системы, 2009. № 4. С. 72–74.

Рассмотрена динамика изменения времени выполнения оператором отдельных операций и задачи в целом в зависимости от изменения напряженности деятельности оператора на примере определенной структуры.

Ключевые слова — оценка, время, напряженность, деятельность.

Список лит.: 5 назв.

УДК 621.396.969.34:629.735

A method of radar determination of group air target
Bazhenov A. V., Afonin I. E. IUS, 2009. N 4. P. 68–71.

A method of the radar determination of group air target, based on the patterns response on radar signals of the compound structure is offered. The algorithm of radar determination, realizing this method is presented.

Keywords — radar determination, group air target, compound structure signals, signal of phase manipulation, air on-board radar.

Refs: 2 titles.

УДК 331.54

A model of the estimation of a task execution

Krasnova A. I., Paderno P. I., Balkharet A. A. IUS, 2009. N 4. P. 72–74.

The dynamics of the change of the performance's time by the operator of separate operations and task as a whole, depending on the change of activity's intensity of the operator by an example of certain structure is considered.

Keywords — estimation, time, intensity, activity.

Refs: 5 titles.



Федеральное агентство по науке и инновациям
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В.И. Ульянова (Ленина)»

Всероссийская научная молодежная школа «Биомедицинская инженерия»
26 - 30 октября 2009 г.

Место проведения: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В.И. Ульянова (Ленина)

Адрес: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

Основные направления работы научной школы:

- перспективы и прогноз развития биомедицинской инженерии;
- информационные и компьютерные технологии в биомедицинской инженерии;
- микро и нанотехнологии в биомедицинской инженерии;
- методы и технические средства неинвазивной оценки состояния здоровья человека;
- медицинские информационные системы (телемедицина и др.);
- системы скринирующей диагностики состояния здоровья населения;
- биотехнические системы медицинского назначения;
- современные методы обработки и анализа биомедицинской информации;
- методические вопросы повышения качества подготовки специалистов в области биомедицинской инженерии.

Контрольные сроки

Желающие принять участие в работе молодежной научной школы должны в срок до 10 октября 2009 г.
направить в адрес оргкомитета заявку по установленной форме.

Дополнительная информация и справки

Организационный комитет конференции:

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), кафедра Биомедицинской электроники и охраны среды.
197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

Подробная информация о проводимой научной школе представлена
на сайте университета <http://www.eltech.ru>, раздел Всероссийская научная молодежная школа

«Биомедицинская инженерия»

Эл. адрес: bme@eltech.ru

Телефон/факс: (812) 234-01-33



ISSN 1684-8853

