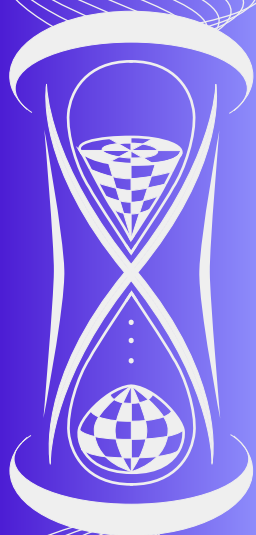


ISSN 2222-8772

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ
СТРУКТУРЫ
И
МОДЕЛИРОВАНИЕ

№ 4(32)
2014



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Ф.М. ДОСТОЕВСКОГО»**

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ
СТРУКТУРЫ
И
МОДЕЛИРОВАНИЕ**

№ 4(32)

Омск
2014

Математические структуры и моделирование. — Омск : Омский государственный университет, 2014. — № 4(32). — 258 с.

ISSN 2222-8772 (print)

ISSN 2222-8799 (online)

Редакционная коллегия

- Н. Ф. Богаченко** технический редактор, канд. физ.-мат. наук, доцент, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского.
- В. Я. Волков** доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой начертательной геометрии, инженерной и машинной графики, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ).
- А. Г. Гринь** доктор физ.-мат. наук, профессор, кафедра кибернетики, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского.
- С. И. Горлов** доктор физ.-мат. наук, профессор, Нижневартовский государственный университет.
- А. К. Гуц** главный редактор, председатель редакционной коллегии, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой кибернетики, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского.
- А. Н. Кабанов** канд. физ.-мат. наук, кафедра кибернетики, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского.
- П. А. Корчагин** доктор техн. наук, профессор, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ).
- Д. Н. Лавров** выпускающий редактор, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. компьютерных технологий и сетей, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского.
- A. A. Fedorenko** Ph.D., Researcher (CR1) at the French National Centre of Scientific Research (CNRS) Laboratoire de Physique de l'ENS-Lyon, France.
- V. Kreinovich** Ph.D., Professor, Computer Science Department, University of Texas at El Paso, Texas, USA.

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Омский государственный университет имени Ф. М. Достоевского»

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС77-57908 от 28 апреля 2014 г.

Адрес научной редакции

Россия, 644077, Омск, пр. Мира 55А
Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского
факультет компьютерных наук

E-mail: guts@omsu.ru, lavrov@omsu.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

В журнале публикуются статьи, в которых излагаются результаты исследований по фундаментальной и прикладной математике, теоретической физике, компьютерным наукам, философии и истории математики и информатики, а также размышления, касающиеся окружающей нас природы и общества. Объекты исследования должны быть представлены в форме некоторых математических структур и моделей.

Журнал является реферируемым. Рефераты статей публикуются в «Реферативном журнале» и в журналах «Zentralblatt für Mathematik» (Германия) и «Mathematical Reviews» (США).

Электронная версия журнала представлена в сети Интернет по адресам:

<http://msm.univer.omsk.su>
<http://msm.omsu.ru>

Журнал издаётся на коммерческие средства факультета компьютерных наук Омского государственного университета.

Подписной индекс на второе полугодие по каталогу «Пресса России»: 94082

Электронная почта главного редактора:

guts@omsu.ru

Электронная почта выпускающего редактора:

lavrov@omsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Фундаментальная математика и физика

- С.Ю. Ланина, В.В. Еремина, О.С. Косолапова. *Модифицированные формулы оптического показателя преломления* 6
- Ю.А. Лебедев. *Модель бесконечномерного мультисобытийного пространства-времени Минковского и физический смысл эвереттических ветвлений и склеек* 13
- А.И. Никитин. *Отсутствие глобальных решений начально-краевых задач для систем полупараболических уравнений с нелинейными нелокальными граничными условиями* 23
- Ю.В. Трубников, И.А. Орехова. *О построении нового класса квадратурных формул* 27
- О. Kosheleva. *How to Make Elementary Geometry More Robust and Thus, More Practical: General Algorithms* 32
- J. Lorkowski, V. Kreinovich. *How to Gauge Unknown Unknowns: A Possible Theoretical Explanation of the Usual Safety Factor of 2* 49

Прикладная математика и моделирование

- В.В. Гольдяпин. *Вероятностный метод формирования симптомокомплексов* 53
- В.А. Воловоденко, Н.А. Ефремова, В.И. Ефремов. *Марковские процессы в моделировании эволюции геофизических полей* 59
- Е.А. Корчевская, Л.В. Маркова, А.Н. Красоткина. *Автоматизированная система распределённых вычислений для численного решения алгебраических задач* 69
- О.М. Куликова. *Сценарное стратегическое планирование: математическая постановка задачи и алгоритм построения* 73
- Б.К. Нартов. *Метод фиктивных потоков в моделях переброски ресурсов* 77
- А.Р. Нургатин. *Метод улучшения алгоритма Виолы-Джонса* 83

Наши публикации



А.М. Пуртов. *Использование компьютерных технологий и математических методов для анализа автотранспортных сетей* 89

Б.И. Пякилла. *Идентификация математической модели робототехнической системы* ... 100

Е.В. Рабинович, К.С. Ганчин, И.М. Пупышев, Г.С. Шефель. *Модель сейсмического импульса, возникающего при гидравлическом разрыве пласта* 105

В.А. Шовин. *Факторное моделирование с помощью нейронной сети* 112

V.A. Marenko, O.N. Luchko. *Cognitive Modelling Application for Social Tension Study* 116

B. Rivera, F. Zapata, V. Kreinovich. *Granularity Explains Empirical Factor-of-Three Relation Between Probabilities of Pulmonary Embolism in Different Patient Categories* 128

L.V. Rozanova, A.Y. Temerev, E.V. Myakisheva. *On applications of Lennard-Johnes potential as a social force for crowd behavior modeling* 134

Компьютерные науки

Н.В. Астапенко, Е.С. Моложенко. *Разработка системы поддержки принятия решений отдела экологической экспертизы ГУ «Департамент природных ресурсов СКО»* 146

Н.В. Астапенко, А.А. Носов. *Разработка web-приложения «Мероприятия» для сайта кафедры ИС* 152

Н.В. Астапенко, А.В. Повельев. *Разработка web-приложения «Кураторство» для сайта кафедры ИС* 157

Н.В. Астапенко, С.В. Тарасов. *Разработка сайта для поддержки организации практики в учебном процессе вуза* 163

Н.В. Астапенко, Р.К. Шоткин. *Разработка web-приложения «Повышение квалификации» для сайта кафедры ИС* 169

И.Е. Евдокимов. *Современные тенденции применения суперкомпьютеров в инженерном деле* 174

В номер включены полные тексты статей материалов II Международной научной конференции «Математическое и компьютерное моделирование», которая состоялась на факультете компьютерных наук ОмГУ им. Ф.М. Достоевского 21 ноября 2014 г. **при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №14-01-20511).**

С тезисами докладов и аннотациями статей можно ознакомиться в сборнике материалов Международной научной конференции «Математическое и компьютерное моделирование».

Материалы второй конференции, проведённой 21 ноября 2014 г., представлены по адресу:

<http://www.univer.omsk.su/departs/compsci/nauka/Conf/second.pdf>

Материалы первой конференции, проведённой 18 октября 2013 г., представлены по адресу:

<http://www.univer.omsk.su/departs/compsci/nauka/Conf/first.pdf>

Сайт факультета компьютерных наук:

<http://fkn.univer.omsk.su>

В.С. Веденеев, И.В. Бычков. *Применение экстремального программирования при разработке научных приложений*180

С.Н. Верзунов, Н.М. Лыченко. *Разработка автоматизированной системы для анализа геомагнитных вариаций на основе вейвлет-технологий*185

А.Ю. Воробьёв. *Предметно-ориентированный язык программирования для разработки программного обеспечения для тестирования электронных устройств*198

А.Л. Гуляева. *Разработка информационно-управляющей системы поддержки и сопровождения научно-исследовательской работы вуза*206

А.К. Гуц, А.Г. Дружинин. *Информационно-аналитический модуль долгосрочного диспансерного наблюдения пациентов, перенёвших инфаркт миокарда*210

Е.А. Козак, Е.В. Шевчук. *Применение мобильных технологий в учебном процессе вуза*217

Е.А. Тюменцев. *Карты Шухарта как инструмент повышения надёжности в акторной модели*221

Информационная безопасность

С.В. Белим, Е.А. Илющечкин. *Применение семейств ортогональных функций для построения устойчивых цифровых водяных знаков* .225

Д.М. Бречка, Р.А. Исин, М.В. Шабанов. *Программная реализация алгоритмов поиска несанкционированных доступов*232

В.С. Веденеев, И.В. Бычков. *Система выявления инсайдеров*236

Т.В. Вахний, А.К. Гуц, С.Ю. Кузьмин. *Оптимальный подбор антивирусной программы и межсетевого экрана с помощью теории игр* .240

Д.А. Москвин, Д.В. Иванов. *Разработка и экспериментальная оценка методов защиты беспроводных самоорганизующихся сетей* ...247

Л.С. Носов. *Оценка защищённости СВТ путём моделирования канала ПЭМИН*254

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ФОРМУЛЫ ОПТИЧЕСКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

С.Ю. Ланина

к.ф.-м.н., сотрудник лаборатории моделирования, обработки и управления
информацией, e-mail: swetl.lanina@yandex.ru

В.В. Еремина

к.ф.-м.н., доцент факультета математики и компьютерных наук,
e-mail: banysheva@mail.ru

О.С. Косолапова

аспирант, e-mail: chess.kosolapova@gmail.com

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Амурский
государственный университет», г. Благовещенск

Аннотация. Рассматривается вывод формул для вычисления оптического показателя преломления и оптического показателя поглощения, проверяется адекватность полученных зависимостей реальным спектрам рассматриваемых характеристик.

Ключевые слова: оптический показатель преломления, оптический показатель поглощения.

Взаимосвязь химического состава диэлектрика, его структуры с его поляризационными свойствами обычно выявляются за счёт анализа частотных спектров, отображающих преломление или поглощение им светового излучения. Кроме того, оптические постоянные в области собственного поглощения вещества являются фундаментальными константами, характеризующими целый ряд физико-химических параметров вещества. Измерение оптических характеристик материалов в высокочастотной области электромагнитного спектра позволяет рассчитать его характерные диэлектрические параметры, экспериментальное определение которых другими способами в настоящий момент технически не реализуемо. В свою очередь, актуальна и обратная задача, связанная с прогнозированием оптических характеристик перспективных материалов, проводимым на базе имитационного моделирования их поляризационных спектров.

Как известно [1], при рассмотрении взаимодействия вещества с переменным электромагнитным полем выражения комплексной диэлектрической проницаемости образца и его комплексного показателя преломления $n(j\omega)$ принимают вид подобающих комплексных функций:

$$\begin{aligned} n(j\omega) &= n(\omega) + j\chi(\omega); \\ \varepsilon(j\omega) &= \varepsilon'(\omega) + j\varepsilon''(\omega), \end{aligned} \tag{1}$$

где $n(\omega)$ и $\chi(\omega)$ — соответственно, частотные зависимости показателя преломления и показателя поглощения.

В свою очередь, принимая во внимание соотношение $n^2 = \varepsilon$, частотные зависимости разбираемых функциональных зависимостей общепринято связывать между собой на базе непосредственно вытекающего выражения:

$$\varepsilon''(\omega) + j\varepsilon'(\omega) = n^2(\omega) - \chi^2(\omega) + j2n(\omega)\chi(\omega). \quad (2)$$

Или

$$\begin{aligned} \varepsilon'(\omega) &= n^2(\omega) - \chi^2(\omega); \\ \varepsilon''(\omega) &= 2n(\omega)\chi(\omega). \end{aligned} \quad (3)$$

Рассмотрим математическое описание (3) в качестве системы линейных алгебраических уравнений, отвечающих частному виду функций $n(\omega)$ и $\chi(\omega)$ при скалярном значении частоты, характерному для действия статического внешнего поля. В этом случае, исключение переменной χ , даёт уравнение

$$n^4 - \varepsilon' n^2 - 0,25\varepsilon''^2 = 0, \quad (4)$$

решение которого даёт два вещественных и два мнимых корня:

$$n_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{\varepsilon' - \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}}{2}}; \quad n_{3,4} = \pm \sqrt{\frac{\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}}{2}}. \quad (5)$$

Поскольку исследуемая характеристика, по своему определению, описывает численную функцию вещественной части комплексной характеристики $n(j\omega)$, то из полученных решений следует отбросить мнимые корни $n_{1,2}$. Рассматривая оставшуюся пару вещественных корней и принимая во внимание физическую сущность рассматриваемой функции, получим, что практической ценностью обладает единственный (положительный) корень.

Следовательно, частотная зависимость оптического показателя преломления может быть представлена в виде:

$$n(\omega) = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon'^2(\omega) + \varepsilon''^2(\omega)} + \varepsilon'(\omega)}{2}}. \quad (6)$$

Действуя аналогичным образом, из исходной системы уравнений исключим переменную n :

$$\begin{aligned} \chi^4 + \varepsilon' \chi^2 - 0,25\varepsilon''^2 &= 0, \Rightarrow \\ \chi_{1,2} &= \pm \sqrt{\frac{-\varepsilon' - \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}}{2}}; \quad \chi_{3,4} = \pm \sqrt{\frac{-\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}}{2}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Рассуждая аналогично, получим, что частотная зависимость оптического показателя поглощения имеет вид:

$$\chi(\omega) = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon'^2(\omega) + \varepsilon''^2(\omega)} - \varepsilon'(\omega)}{2}}. \quad (8)$$

Учитывая, что уравнения (6) и (8), описывающие частотные характеристики комплексного показателя преломления, включают в себя выражение амплитудной частотной характеристики $\varepsilon_{Am}(\omega)$ комплексной диэлектрической проницаемости, то они могут быть эквивалентно представлены в виде:

$$n(\omega) = \sqrt{\frac{\varepsilon_{Am}(\omega) + \varepsilon'(\omega)}{2}}; \quad (9)$$

$$\chi(\omega) = \sqrt{\frac{\varepsilon_{Am}(\omega) - \varepsilon'(\omega)}{2}}. \quad (10)$$

Таким образом, принимая во внимание структуры частотных зависимостей оптических показателей преломления и поглощения представленного типа, можно отметить, что они характеризуют взаимосвязь частотных спектров реальных составляющих комплексной диэлектрической проницаемости материала.

С целью проведения качественной оценки практической эффективности рассматриваемых уравнений был выполнен ряд вычислительных экспериментов, общим объектом которых послужил гипотетический диэлектрик, состоящий из частиц одной и той же разновидности. Разберём выявленные с их помощью особенности внешнего вида имитационных графиков $n(\omega)$ и $\chi(\omega)$, достаточно объективно характеризующих общие особенности изучаемых спектральных зависимостей применительно к отдельному рассмотрению упругих и релаксационных колебаний частиц.

Первая часть проведённого исследования заключалась в расчётах спектра $n(\omega)$ для условия существования упругих колебаний частиц, коэффициент затухания которых полагался в десять раз меньше частоты их собственных колебаний ω_0 . Вторая часть эксперимента представляла моделирование спектра $n(\omega)$ для релаксационных колебаний тех же самых частиц, коэффициент затухания которых задавался в десять раз больше частот их собственных колебаний. Полученные имитационные спектры изображены на рис. 1.

Анализ графиков показал, что графический образ частотного спектра $n(\omega)$, имитируемого для упругих колебаний частиц, существенно отличается от его реальных аналогов, которые чаще всего представляют собой резонансный всплеск с острым углом в нижней части. В свою очередь, спектр, рассчитанный на базе использования формулы (6), обладает явно выраженным горизонтальным участком, находящимся вблизи частоты собственных колебаний (рис. 1, а). При этом для моделирования спектра $n(\omega)$ в случае релаксационных колебаний тех же самых частиц подобная вычислительная аномалия отсутствует, а полученные графики хорошо соответствуют данным физического эксперимента в рамках их оценки с качественной точки зрения (рис. 1, б).

Причина полученного несовпадения может заключаться в следующем: с одной стороны, вещественная частотная характеристика комплексной диэлектрической проницаемости разбираемого образца, детализируемая в области электромагнитного резонанса его частиц для случая их упругих колебаний, обладает как положительными, так и отрицательными значениями; с другой –

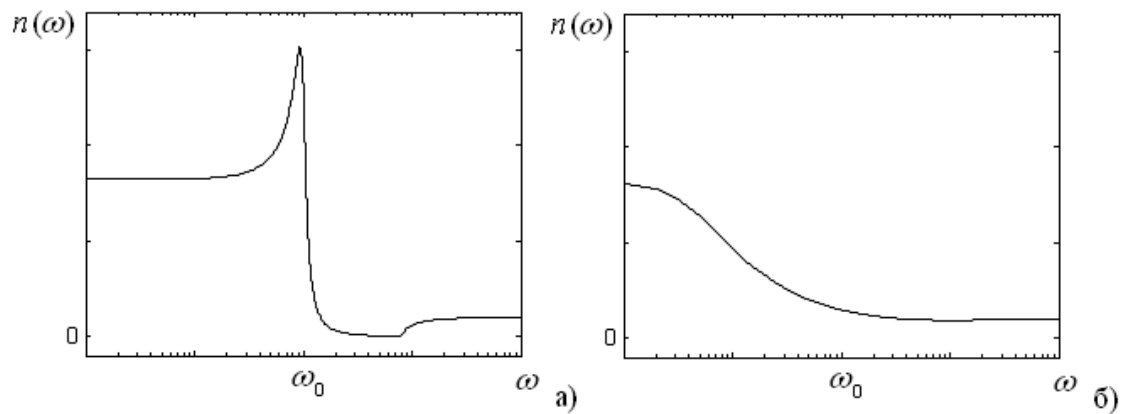


Рис. 1. Расчетные спектры оптического показателя преломления: а) — упругие колебания частиц; б) — релаксационные колебания

его мнимая частотная характеристика имеет практически нулевые значения во всем диапазоне частот за исключением узкого энергетического выброса с максимумом на резонансной частоте. Следовательно, присутствие горизонтального участка, отмеченного выше на спектре $n(\omega)$, оказывается вызванным тем, что при совместном выполнении условий $\varepsilon''(\omega) \simeq 0$ и $\varepsilon'(\omega) < 0$ зависимость вида (6) даёт приблизительно нулевые значения, обусловленные взаимным подавлением текущих величин $\varepsilon'(\omega)$:

$$\sqrt{\varepsilon'^2(\omega) + 0} - \varepsilon'(\omega) = 0. \quad (11)$$

Сложившаяся ситуация может быть исправлена за счёт использования только абсолютных величин вещественной частотной характеристики $\varepsilon(j\omega)$, т.е. видоизменения структуры традиционного выражения $n(\omega)$ к его альтернативному представлению в виде:

$$n(\omega) = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon'^2(\omega) + \varepsilon''^2(\omega)} + |\varepsilon'(\omega)|}{2}}. \quad (12)$$

Результаты имитационного моделирования частотной зависимости оптического показателя преломления, проведённого на базе использования модифицированной формулы (12), изображены на рис. 2. Объективная оценка вытекающих изменений внешнего вида исследуемого спектрального графика показывает, что принятие предлагаемых авторами мер, направленных на его качественное улучшение, оказывается весьма эффективным. Следовательно, применение уравнения (12) для проведения практических расчётов частотных зависимостей $n(\omega)$ позволяет имитировать оптические спектры материалов, наиболее адекватные их физически измеряемым свойствам.

Аналогичным образом были построены имитационные спектры, полученные с помощью уравнения (8) и изображённые на рис. 3. Необходимо отметить, что физические измерения разбираемых зависимостей показывают, что внешний

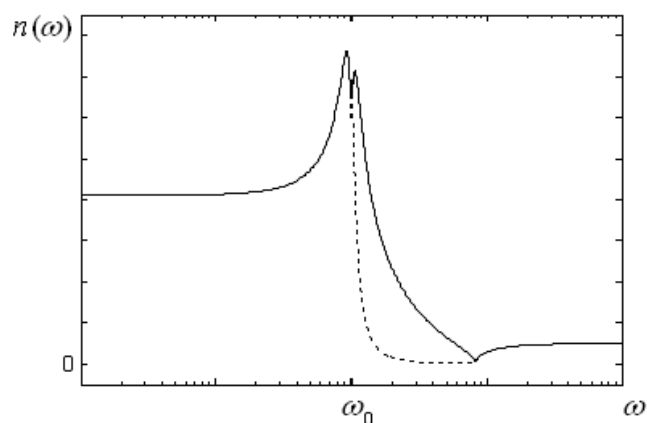
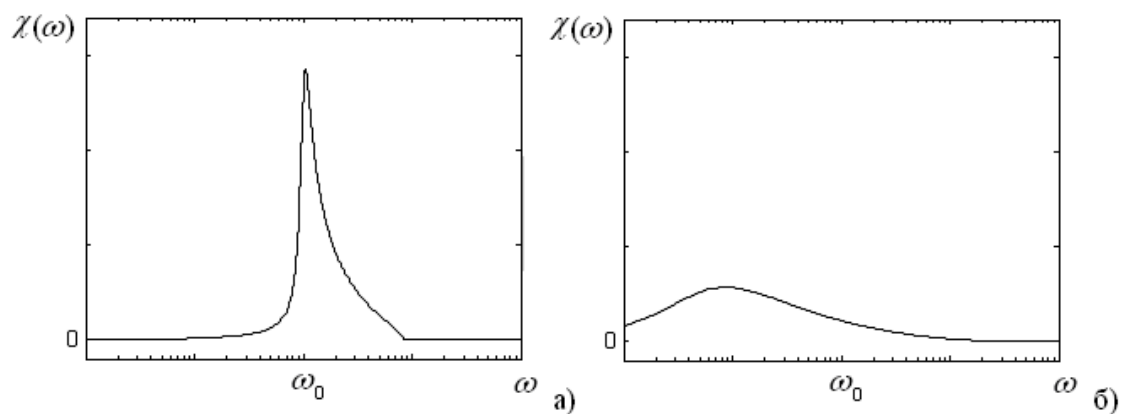
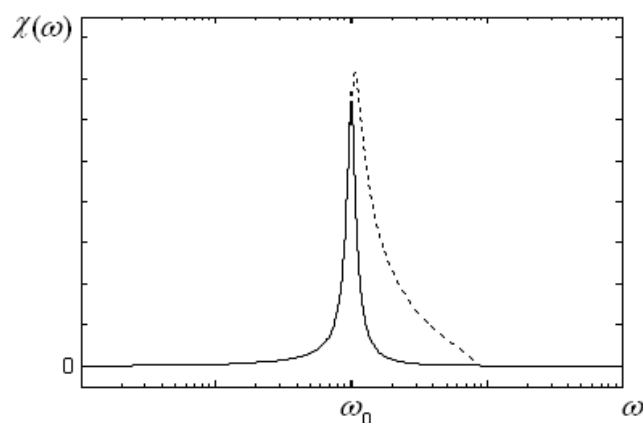
Рис. 2. Модифицированный расчётный спектр $n(\omega)$ 

Рис. 3. Расчётные спектры оптического показателя поглощения: а) упругие колебания частиц; б) релаксационные колебания

вид их графиков представляет совокупность энергетических выбросов, симметричных относительно своих вертикальных осей.

Анализ представленных графиков показывает, что расчёт оптических характеристик релаксационных колебаний даёт изображение полосы поглощения, качественно соответствующее их реальной картине. В свою очередь, при рассмотрении упругих колебаний частиц имитационный спектр опять принимает неестественный вид.

Причина очередной вычислительной аномалии, также как и в предыдущем случае, может быть связана с фактом существования отрицательных значений $\varepsilon'(\omega)$, характерных для упругих поляризационных процессов, и устранена за счёт использования только её абсолютных величин. Для этого уравнение частотной зависимости $\chi(\omega)$, обладающее традиционной структурой (8), должно быть модифицировано к виду:

Рис. 4. Модифицированный расчётный спектр $\chi(\omega)$

$$\chi(\omega) = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon'^2(\omega) + \varepsilon''^2(\omega)} - |\varepsilon'(\omega)|}{2}}. \quad (13)$$

Результаты имитационного моделирования частотной зависимости оптического показателя поглощения, проведённого на базе предлагаемой формулы (13), изображены на рис. 4.

Оценка полученных изменений исследуемого графика показывает качественное улучшение его вида. Следовательно, модифицированное уравнение (13) позволяет имитировать оптические спектры показателя поглощения материалов, наиболее адекватные их физически измеряемым свойствам.

В заключении отметим, что полученные результаты позволяют обоснованно сформулировать следующие выводы: частотные зависимости оптических показателей преломления и поглощения светового излучения диэлектрическим материалом целиком определяются взаимосвязью величин вещественной и амплитудной частотных характеристик его комплексной диэлектрической проницаемости; максимумы полос поглощения соответствуют резонансным частотам, величины которых меньше значений частот собственных колебаний частиц. При этом их физически наблюдаемая разница особенно ярко выражается в релаксационных процессах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юхневич Г.В. Инфракрасная спектроскопия воды. М.: Наука, 1973.
2. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред. Справочник. Л.: Химия. 1984.
3. Еремина В.В. Особенности поляризационных спектров конденсированных диэлектрических сред. I // Информатика и системы управления. 2009. № 2(20). С. 60–65.

MODIFIED FORMULA OPTICAL REFRACTIVE INDEX

S.Y. Lanina

Researcher of the Laboratory of modeling, information processing and management,
candidate of physical and mathematical sciences, e-mail: swetl.lanina@yandex.ru

V.V. Eremina

Associate Professor of Information and Control Systems of the Faculty of Mathematics
and Computer Science, PhD in Physics and Mathematics, e-mail: anysheva@mail.ru

O.S. Kosolapova

post-graduate student, Department of Information and councils-Barking Systems Faculty
of Mathematics and Informatics, e-mail: chess.kosolapova@gmail.com

Amur State University, Blagoveshchensk

Abstract. We consider the derivation of the formulas for the calculation of the optical refractive index and optical absorption coefficient, and verify their adequacy to the real spectra of the characteristics.

Keywords: optical refractive index, optical absorption coefficient.

МОДЕЛЬ БЕСКОНЕЧНОМЕРНОГО МУЛЬТИСОБЫТИЙНОГО ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ МИНКОВСКОГО И ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ЭВЕРЕТТИЧЕСКИХ ВЕТВЛЕНИЙ И СКЛЕЕК

Ю.А. Лебедев

доцент, к.т.н., e-mail: lebedev@bmstu.ru

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Аннотация. Рассмотрен физический смысл модели бесконечномерного пространства-времени Минковского (МБПВМ). Показано, что эта модель качественно отражает такие особенности эвереттического рассмотрения пространства-времени Минковского, как эвереттические ветвления и склейки, но является неполной, поскольку не учитывает наличие психидных компонентов Бытия — сознания и разума. Выявлены идейно-методические связи МБПВМ с гипотезой А.К. Гуца о существовании стационарных кластеров пространства-времени — исторических эпох, а также с метаболическим подходом А.П. Левича к объяснению феномена времени.

Ключевые слова: моделирование, пространство-время Минковского, эвереттика, эвереттические ветвления, эвереттические склейки, сознание, метаболический конструкт пространства-времени, ЭПР-парадокс.

В работе [1] предложена модель бесконечномерного пространства-времени Минковского (МБПВМ), в которой квантовые флуктуации вакуума описываются с помощью введения бесконечного количества ортогональных к оси «математического времени (*ict*)» новых временных осей ($ic_k\tau_k$). Поскольку предложенная конструкция предназначена для описания физического явления квантовых флуктуаций в нашем универсе, фактически в рассмотрение вводится континуальное множество бесконечных пространств-времени, каждый элемент которого описывает флуктуации энергии определённого масштаба. Каждая последующая k -тая ось пересекает ось математического времени через временной интервал Δt , соответствующий энергии k -той флуктуации ΔE_k , рассчитываемый из соотношения неопределённостей Гейзенберга-Бора:

$$\Delta t = \hbar / \Delta E_k, \quad (1)$$

где $\hbar$ — постоянная Дирака.

Поскольку количество флуктуаций в данной пространственной точке в принципе неограниченно, k представляет собой натуральное число, и размерность модели равна счётной бесконечности.

Этот математический конструкт может быть использован как модель универса эвереттического типа. Параметру модели c_k («скорость света по оси τ_k »), физический смысл которого авторами работы [1] не обсуждается, можно придать смысл частоты прохождения «флуктуационного кванта» через «физическую точку» $(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t)$ пространства-времени Минковского. При этом частотой будет параметр $\nu_{fl} = c_k / \Delta l$ (где l — характерный размер этой «точки»).

Следует иметь в виду, что оси t и τ_k субстанционально принципиально различны — времена τ_k являются квантованными субстанциональными временами, кванты которых $\Delta \tau_k$ обладают энергией ΔE_k , рассчитываемой по ур.(1), а математическое время t — реляционное время, определяющееся количеством наступлений события A в данной пространственной точке x . Именно эта особенность модели — её динамический характер, отражающий изменение состояния системы в точке x — есть событие A или нет события A — и определяет мультисобытийность рассматриваемой модели.

В таком случае параметр c_k будет определять вероятность осуществления события $A(P_{fl})$ — взаимодействия флуктуационного кванта с находящимся в этой «физической точке» объектом B в нашем универсе (например, излучения электромагнитного кванта возбуждённым атомом) в единицу «реляционного времени t ». Математически связь P_{fl} с c_k имеет вид: $P_{fl} = c_k \Delta t / \Delta l$.

При такой интерпретации на каждом временном отрезке Δt возникает бинарное эвереттическое ветвление: событие A либо произойдёт, либо нет. Это вскрывает важный элемент механизма эвереттических явлений — всякое сложное ветвление является последовательностью элементарных актов, каждый из которых бинарен. Этот элемент демонстрирует проявление Пятой аксиомы эвереттики [2] о фрактальном характере физических закономерностей — точно также каждый истинно элементарный акт всякого физического (а также и химического, и биологического, и социального) взаимодействия всегда бинарен. Элементарный акт всегда альтернативен — либо A , либо не- A . И развитие взаимодействия продолжается по тому же дуальному механизму распада не- A на B и не- B .

Существенно то, что, поскольку оси t и τ_k описывают течение субстанционально различных, но онтологически равноправных времён, равно бытийственными и активными являются и будущее, и прошлое для любой точки на оси t . Независимое течение времён τ_k порождает ветвления прошлого даже более интенсивно, чем ветвления будущего. Как было показано в [1], это связано с комплементарностью знаков Δt и ΔE в ур. (1) для временной координаты t — прошлое ($\Delta t > 0$) «вводит» энергию в систему ($\Delta E < 0$), а будущее ($\Delta t > 0$) «выводит» её из системы ($\Delta E > 0$).

Механизм МБПВМ объясняет и возникновение необходимых условий для эвереттических склеек. В контексте этой модели необходимое условие для возникновения склейки — это пересечение ветвей альтерверсов независимых событий A_i , причинно обусловленных событиями в точках $k_3 i$ (начальных точках ветвлений в модели [1]) (рис. 1).

Это условие, однако, являясь физико-геометрическим, не может быть до-

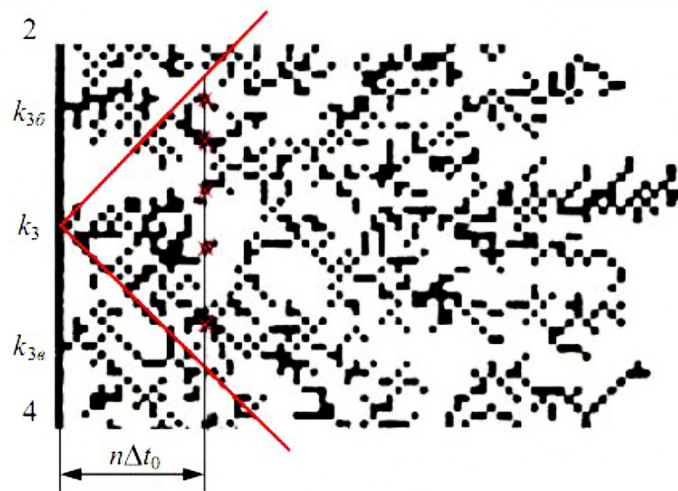


Рис. 1. Фрактальное моделирование процесса эвереттических ветвлений и склеек. Точки (■) — события, кресты (x) — склейки (по [1]).

статочным. Оно обеспечивает «касание» ветвей альтерверса, необходимое для склейки, но ничего не говорит о дальнейшей эволюции точки касания. С эвереттической точки зрения касание превращается в склейку в результате вовлечения в процесс взаимодействия сознания. Оно выполняет две функции.

Во-первых, оно делает выбор следующего шага по оси ict . В рассматриваемой двумерной по пространству Минковского модели в зависимости от того, в какой из точек — $(t_i + n\Delta t_i)$ или $(t_i - m\Delta t_i)$ по осям τ_{i+n} или τ_{i-m} имеется активный для данного процесса флуктуационный квант энергии. При значениях n и m больше единицы акт выбора порождает ЭПР-парадокс.

Во-вторых, оно фиксирует сделанный выбор в памяти наблюдателя события А. Заполнение очередной ячейки памяти наблюдателя формирует стрелу времени по оси ict , выявляя тем самым реляционную природу этого времени.

К сожалению, сознание, как атрибут всякого события А, являющегося соотносённым квантовым состоянием «объект-наблюдатель», не представлено в качестве сущностного элемента в МБПВМ. Косвенным образом в этой модели отражена вторая функция сознания, поскольку последовательность Δt_i представлена в форме оси времени. Поэтому МБПВМ является неполной моделью действительности. Используя аналогию с квантовой механикой, вытекающую из Пятой аксиомы эвереттики, можно сказать, что МБПВМ — это модель орбитали, по которой движется сознание наблюдателя. Тогда сознание как свойство бытийствующей на орбитали сущности аналогично спину квантовой частицы. Как известно, спин является проявлением неких внутренних степеней свободы квантового объекта, автономных относительно пространства-времени орбитали. Поскольку пространство-время в ОТО является свойством гравитирующих тел, а гравитационные свойства имманентно присущи любому материальному объекту, спин не связан с массой, не подвержен влиянию гравитации и потому является проявлением некоторой не-материальной сущности.

Но если спину и его проявлению в пространстве-времени — собственному моменту импульса элементарных частиц — посвящено огромное число фундаментальных физических работ, то сознание, будучи также не-материальной сущностью [3], до настоящего времени не рассматривается ни в квантовых, ни в гравитационных физических моделях, как совместимый с ними атрибут бытия.

Хотелось бы надеяться, что осознание эвереттичности бытия достаточно быстро привлечёт внимание теоретиков к сознанию, как столь же фундаментальной физической сущности, что и спин, и проблема математического описания сознания и его проявлений в пространстве-времени будет решена в рамках междисциплинарного рассмотрения следующего гёделевского уровня структуры бытия — уровня изучения не-материальных сущностей и их взаимодействия с веществом, включая и тёмное, и физическими полями, включая инфлантонное и поля Хиггса.

На пути к решению этой проблемы уже преодолены два серьёзных психологических барьера: физика рассматривает многомерные пространства (струнные теории), а психология описывает многочисленные типы сознания. Настоящая работа, вводящая в рассмотрение бесконечномерные временные множества, пополняет корпус темпорологических работ, посвящённых многомерному времени (см., например, [4,5]).

Одним из интересных следствий МБПВМ является обоснование возможности реализации идеи А.К. Гуца о существовании стационарных кластеров пространства-времени — исторических эпох: «Все исторические эпохи существуют, они не сменяют одна другую, они являются образцами (паттернами) Реальности» [6].

Это явление можно считать проявлением особой прочности ментальных связей в хорошо сформированных метавидуумах («эпохах» в терминологии А.К. Гуца).

Его суть состоит в следующем. Допустим, мы рассматриваем какую-то конкретную историческую эпоху, например, «пушкинскую эпоху». Этот пример взят просто потому, что вряд ли нужно объяснять читателю любого типа — «физику» ли, «лирику» ли, что имеется в виду эпоха, когда умонастроения в обществе были «онегинскими», быт — «ларинским», а наука — «ньютоновской». Эта совокупность общественных отношений и определяет эпоху, её неповторимый «аромат». Обеспечивается характерность эпохи ментальной склейкой людей, живущих по её законам. Однако в поступательном движении истории в какой-то момент появляется открытие, литературное произведение, музыкальный стиль, просто мода, которые эту склейку разрушают, и наступает новая эпоха. В приведённом примере она из «пушкинской» переходит в «николаевскую»...

Концепция А.К. Гуца состоит в том, что переход в новую эпоху, как всякий выбор пути, имеет альтернативы. И промахнись Дантес — пушкинская эпоха могла бы продолжить своё развитие в нашей ветви альтерверса. Или, точнее, и Дантес, и Пушкин в момент выстрела приняли решения, которые перевели нас в николаевскую эпоху.

Ментальный конструкт — эпоха — также, как и жизнь человека, в альтерверсе может развиваться, не прерываясь. Эта идея А.К. Гуца является развитием идеи М. Тегмарка о «квантовом бессмертии» [7]. Вслед за гипотезой Тегмарка о личном бессмертии индивидуума, гипотеза Гуца является гипотезой о личном бессмертии метавидуума.

И если она верна, где-то в пышной кроне российского альтерверса «до сих пор» (если смотреть в «абсолютном времени») неизбежный технический и социальный прогресс сочетается с понятиями чести, достоинства, мужского дружества так же, как и в пушкинскую эпоху. И сегодняшняя склейка с ментальной конструкцией такого типа может привести наблюдателя в мизансцену, где, как написал Д. Самойлов, *«Пушкин Поедет во дворец В серебристом автомобиле С крепостным шофёром Савельичем»*. «В реальной истории» ментально перепутанным с пушкинской эпохой был канцлер Горчаков — «последний лицеист»...

Тот вариант МБПВМ, который предложен в [1], не вполне объясняет возможность образования таких паттернов. Дело в том, что вариант МБПВМ из работы [1] ничего не говорит о геометрической структуре векторного пространства $\{\vec{\tau}_k\}$, подразумевая только его компланарность и ортогональность по отношению к оси ict . Внесение дополнительных условий, конкретизирующих взаимонаправленность пространственных и временных координат в этой модели, позволяет описывать пространственные корреляции событий на оси τ_k , значительно разнесённых по пространственной координатной оси x (парадокс ЭПР). Для этого нужно рассматривать МБПВМ с параллельным или антипараллельным расположением пространственной оси x и временных осей τ_k .

Устойчивость же образовавшихся паттернов, т.е. их онтологическое существование при развитии альтерверса, должен обеспечить механизм синхронизации пульсаций квантовых флуктуаций. Эту задачу путём соответствующей настройки параметров c_k должно выполнять сознание метавидуума исторической эпохи, как одного из метавидуумов всякого «сейчас»: «каждая общественная группа, т.е. каждый метавидуум формирует свою “путеводную нить”» [8, стр. 305].

Предположение о возможности настройки параметров c_k позволяет рассматривать закон сохранения энергии в абсолютной форме: при всяком физическом взаимодействии, включая и квантовые флуктуации, суммарное изменение энергии изолированной системы равно нулю.

Применительно к процессам возникновения квантовых флуктуаций это означает, что флуктуация $F_{\leftrightarrow}$ является суперпозицией двух состояний $F_{\rightarrow}$ и $F_{\leftarrow}$:

$$\Psi(F_{\leftrightarrow}) = a\Psi(F_{\rightarrow}) + b\Psi(F_{\leftarrow}). \quad (2)$$

Отмеченная ранее большая активность прошлого в генерации флуктуаций должна приводить к тому, что для нормировочных коэффициентов a и b в ур. (2) должно быть справедливо неравенство $b > a$.

И процесс возникновения флуктуации в нашем «здесь-и-сейчас» является процессом декогеренции суперпозиции (2) под воздействием сознания на два состояния:

$$F_{\rightarrow} : \Delta t_{\rightarrow} \Delta E_{\rightarrow} = \hbar, \quad (3)$$

$$F_{\leftarrow} : \Delta t_{\leftarrow} \Delta E_{\leftarrow} = \hbar. \quad (4)$$

При этом:

$$\Delta E_{\leftrightarrow} = \Delta E_{\rightarrow} + \Delta E_{\leftarrow} = 0. \quad (5)$$

Состояние $F_{\rightarrow}$ соответствует переходу системы в «абсолютное будущее», а состояние $F_{\leftarrow}$ — в «абсолютное прошлое». Здесь «абсолютность» соответствует перемещению по оси ict в форме стрелы времени.

Как видно из (5), энергия системы после «исчезновения флуктуации» не меняется, однако, в памяти наблюдателя остаются информационные следы протекавших во время существования флуктуации процессов, поскольку, в соответствии с [9], равенство энергии квантов не является достаточным условием их идентичности. Кроме энергии квант содержит и информацию, количество и «качество» (смысл) которой определяются параметрами его квантовой памяти (см. ур. 9 в [9]).

Очевидным следствием (5) является соотношение:

$$\Delta m_{\leftrightarrow} = \Delta m_{\rightarrow} + \Delta m_{\leftarrow} = 0, \quad (6)$$

где m — масса флуктуации.

Таким образом, при каждой квантовой флуктуации, формально «безмассовой», происходит «корреляционный обмен» и информацией, и массой, которая является носителем этой информации.

Соотношение (6) является формальным основанием для утверждения возможности не только ментальных, но и материальных эвереттических склеек. Но описываемый ур. (6) обмен вызван не прямым «перемещением масс» и «передачей информации», а квантово скоррелированными процессами в системах типа (2).

При корреляциях описываемого типа системы «обмениваются» не структурно идентичными, а только количественно равными по массе (в единицах энергии) и по «информационной насыщенности» (в битах) паттернами действительности.

Подробнее вопрос о физических основаниях процессов такого рода рассматривает М.Х. Шульман в работе [10], в которой он обобщает описание локальных квантовых процессов на нелокальные с объяснением квантовой природы ЭПР-парадокса на основе предположения о корреляционных механизмах нелокальных взаимовлияний: «понятие “нелокальность”, в конце концов, равнозначно утверждению о возможности сколь угодно больших скоростей, если не взаимодействия, то, по крайней мере, некоторого взаимовлияния, сущность которого нуждается в явном и ясном физическом описании». Суть этого описания

сводится к следующему: «Передача информации связана с передачей ненулевого количества энергии (со скоростью не больше скорости света), тогда как для корреляции достаточно обмена энергией при в среднем нулевом количестве передаваемой энергии, но отличном от нуля среднем квадрате передаваемой энергии, скорость здесь не ограничивается» [11].

С точки зрения рассматриваемого механизма квантовых флуктуаций реально возможность корреляционного обмена информацией с прошлым и будущим. В связи с этим примечателен следующий факт. В 2007 году П.Р. Амнуэль опубликовал повесть «О чём думала королева?», в которой один из героев открыл некое поле, ответственное за возникновение эвереттических склеек. «Кванты этого поля — я придумал им название «связники», connectors по-английски, — проявляют себя в том, что вызывают склейки, рожают в нашем мире одиночные события, не имеющие здесь ни причины, ни следствия, потому что это события иной ветви Многомирия. А какие-то вполне тривиальные события нашего мира при склейке оказываются на соседней ветви и там наверняка тоже вызывают изумление наблюдателей: там они тоже единичные явления без причины и следствия» [12]. Удивительно не то, что для объяснения возможности эвереттических склеек предложено специальное поле (это очевидный для фантастики посыл), а то, что описанный механизм обмена информацией между ветвями альтерверса является именно флуктуационным и подчиняющимся отмеченной «корреляционной безликости» — содержание (смысл) возникающей и исчезающей при склейках информации не связано друг с другом.

Одной из наиболее близких физических моделей мироздания, которые могут описываться математическим конструктом МБПВМ, является субстанциональный метаболический подход А.П. Левича [13–15]. Он предполагает открытость нашего универса к потокам внешних по отношению к нему субстанций, каждая из которых имеет уникальную сущность и «не смешивается» с другими. Количество этих сущностей может быть весьма велико. По мнению А.П. Левича их, по меньшей мере, столько, сколько существует различных взаимодействий как физической, так и не-физической природы. Иными словами, не исключается возможность проявления субстанциями (и привнесения ими в наш универс) не-материальных характеристик.

Возможность введения любого количества физически осмысленных типов «часов» метаболической модели в геометрический конструкт МБПВМ делает его технически привлекательным для моделей этого класса. Кроме того, поскольку «течение времени в метаболическом подходе отождествлено с появлением (исчезновением) элементов субстанций в системе» [15], каждое временное измерение τ_i может быть однозначно отождествлено с метаболическим зарядом определённого типа. Привлекательна и связь между утверждением метаболического подхода о том, что «объединение шлейфов субстанций от всех источников-зарядов порождает пространство» [15] и утверждением МБПВМ о реляционной природе математического времени t . Совокупность этих утверждений укрепляет уверенность в том, что пространство-время Минковского, также, как и геометрическое пространство — не-материальные сущности. Реляционность сущности пространства в метаболическом подходе следует из утвержде-

ния: «Размерность пространства определена как количество типов образующих пространство субстанций» [15].

Интересна и возможная взаимосвязь свойств элементов субстанции (её квантов) с возможностью физической реализации ЭПР-парадокса. Можно предположить, что это явление становится возможным, если кванты субстанции являются абсолютно упругими фермионами и их шлейф «максимально плотно» заполняет соответствующую временную ось τ_i .

В силу того, что в данной модели принято параллельное или антипараллельное расположение осей τ_i и x , путь, проходимый сигналом об изменении состояния ЭПР-пары от одной частицы субстанции шлейфа до другой, будет равняться планковской длине l_p — наименьшему пути в пространстве Минковского нашего универса. Это означает, что сигнал передается в «физическом пространстве» только через «планковский зазор» между квантами (частицами) субстанции, поскольку принцип Паули не позволяет фермионам взаимопроникать друг в друга. Механизм передачи сигнала в этом случае аналогичен механизму Гротгуса «передачи» протонов при аномальной диффузии в жидкостях с водородной связью [16]. В общем случае это «принцип падающего домино» [17]. При таких условиях V_{inf} — кажущаяся скорость распространения информации по оси τ_i — определяется соотношением:

$$V_{\text{inf}} = \frac{\Delta x}{l_p} \cdot c, \quad (7)$$

где Δx — линейный параметр кванта субстанции, рассчитываемый из соотношения неопределённостей Гейзенберга, c — скорость света в вакууме. Отношение $\frac{\Delta x}{l_p}$ является отношением линейных размеров (масштабов) реляционного пространства, связанного с осями t и τ_i . Из (7) очевидно, что для любого реального диапазона энергий, который соответствует экспериментальным данным, $V_{\text{inf}} \gg c$. Так, в классической работе А. Аспе и П. Гранжиера [18] с оптическими переходами в атоме кальция, $\Delta x \sim 400\text{нм}$ и $V_{\text{inf}} \sim 2,5 \cdot 10^{28}\text{с}$.

Существенно отметить, что подобного рода аномалии возможны только для фермионов. Это означает, что эксперименты по проверке нарушения неравенств Белла с помощью фотонов свидетельствуют о наличии частиц-медиаторов передачи сигнала фермионной природы.

Дальнейшее сравнение структуры и функционирования конструкта МБПВМ с описанием особенностей метаболических моделей показывает возможность адекватного отображения этих особенностей в рамках их описания с помощью МБПВМ.

Выводы:

Проведённое рассмотрение физического смысла модели бесконечномерного пространства-времени Минковского (МБПВМ) показало, что эта модель качественно отражает такие особенности эвереттического рассмотрения пространства-времени Минковского, как эвереттические ветвления и склейки, но является неполной, поскольку не учитывает наличие психоидных компонентов Бытия — сознания и разума. Выявлены идейно-методические связи

МБПВМ с гипотезой А.К. Гуца о существовании стационарных кластеров пространства-времени — исторических эпох, а также с метаболическим подходом А.П. Левича к объяснению феномена времени и ЭПР-парадокса.

Благодарности:

Автор благодарит М.Х. Шульмана, П.Р. Амнуэля, А.Я. Дульфана и А.П. Левича за плодотворное обсуждение некоторых положений настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lebedev Yu.A., Amnuel P.R., Dulphan A.Ya. The Everett axiom of parallelism. arXiv:1304.0310v1.
2. Лебедев Ю.А. Многоликое мироздание. Эвереттическая аксиоматика. М., 2009. 269 с.
3. Лебедев Ю.А. Доклад «Экспериментальное исследование влияния человеческого сознания на характеристики дискретной стохастической последовательности событий» на Российском междисциплинарном семинаре по темпорологии, 03.06.14. URL: <http://www.chronos.msu.ru/ru/seminar/rbag/item/eksperimentalnoe-issledovanie-vliyanie-chelovecheskogo-soznaniya-na-kharakteristiki-diskretnoj-stokhasticheskoy-posledovatelnosti-sobytiy>
4. Dunne J.W. An Experiment with Time. A & C Black, Ltd, 1927. 208 p. Русский перевод: Данн Дж.У. Эксперимент со временем; пер. с англ. Т.В. Ивлевой. М.: Аграф, 2000. 223 с.
5. Бартини Р.О. Некоторые соотношения между физическими константами. Доклады Академии наук СССР, 1965. Т. 163, № 4. С. 861–864.
6. Гуц А.К. Многовариантная вселенная и теория исторических последовательностей // Математические структуры и моделирование. 2012. Вып. 25. С. 70–80. URL: http://www.chronos.msu.ru/old/RREPORTS/guc_mcm.pdf
7. Tegmark M. The interpretation of quantum mechanics: many worlds or many words? 15.09.97. URL: [arXiv:quant-ph/9709032v1](http://arxiv.org/abs/quant-ph/9709032v1)
8. Лебедев Ю.А. Многоликое мироздание. Эвереттическая прагматика. М., 2010. 721 с.
9. Everett H. Relative state formulation of quantum mechanics // Reviews of Modern Physics. 1957. V. 29(3). P. 454–462. URL: <http://www.univer.omsk.su/omsk/Sci/Everett/paper1957.html>
10. Шульман М.Х. Причинность и нелокальные квантовые корреляции. 2008 г. URL: http://timeorigin21.narod.ru/rus_quantum/rus_causality.pdf
11. Шульман М.Х. Частное сообщение по e-mail 04.08.2014 18:56.
12. Амнуэль П.Р. О чём думала королева? // Реальность фантастики. 2007. № 6.
13. Левич А.П. Моделирование природных референтов времени: метаболическое время и пространство. // На пути к пониманию феномена времени: конструкции времени в естествознании. Ч. 3. Методология. Физика. Биология. Математика. Теория систем. М.: «Прогресс-Традиция», 2009. Гл. 10. С. 259–338.
14. Левич А.П. Субстанциональное время открытых систем // Метафизика. 2013. № 5(7). С. 50–73.

15. Левич А.П. Реляционная и субстанциональная концепции в решении проблем изучения времени и пространства // Метафизика. 2014. № 2(12). С. 146–155. URL: http://www.chronos.msu.ru/images/rreports/levich_ap_metafizika.pdf
16. de Grotthuss, C.J.T. Sur la décomposition de l'eau et des corps qu'elle tient en dissolution à l'aide de l'électricité galvanique // Ann. Chim. 1806. V. 58. P. 54–73.
17. Принцип домино. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%CF%F0%E8%ED%F6%E8%EF_%E4%EE%EC%E8%ED%EE
18. Aspect A., Grangier P. About Resonant Scattering and Other Hypothetical Effects in the Orsay Atomic-Cascade Experiment Tests of Bell Inequalities // Lett. Nuovo Cimento. 1985. V. 43, № 8. P. 345–346.

MODEL OF A MULTI-EVENT INFINITE-DIMENSIONAL MINKOWSKI SPACE-TIME AND THE PHYSICAL MEANING OF EVERETTICS BRANCHING AND FUSIONS

Yu.A. Lebedev

Ph.D., Associate Professor, e-mail: lebedev@bmstu.ru

Moscow State Technical University named after Bauman

Abstract. The physical meaning of the model of an infinite-dimensional Minkowski space-time (MIDMST) is considered. It is shown that this model qualitatively reflects such features of everettics consideration of Minkowski space-time as everettics branching and fusions, but it is incomplete because it does not take into account the availability of psychoid components of Genesis — consciousness and intelligence. The ideological and methodological MIDMST connections with the hypothesis of A.K. Guts about the existence of stationary clusters of space-time — historical eras, as well as with the metabolic approach of A.P. Levich to explaining the phenomenon of time and the EPR paradox are revealed.

Keywords: modeling, Minkowski space-time, everettics, everettics branching, everettics fusions, consciousness, metabolic construct of space-time, EPR paradox.

ОТСУТСТВИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ НАЧАЛЬНО-КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ СИСТЕМ ПОЛУЛИНЕЙНЫХ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НЕЛОКАЛЬНЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ

А.И. Никитин

аспирант, e-mail: ip.alexnikitin@gmail.com

Витебский государственный университет им. П.М. Машерова

Аннотация. Рассмотрим начально-краевую задачу для системы реакции-диффузии с нелинейными нелокальными граничными условиями и неотрицательными начальными данными. Приведём достаточные условия отсутствия глобальных решений для случая $\min(m, n) > 1$.

Ключевые слова: параболические уравнения, нелинейность, нелокальность, реакции-диффузии.

В этой работе рассматривается задача для системы полулинейных уравнений с нелокальными граничными условиями:

$$\begin{cases} u_t = \Delta u + c_1(x, t)v^p, v_t = \Delta v + c_2(x, t)u^q, & x \in \Omega, t > 0, \\ u(x, t) = \int_{\Omega} k_1(x, y, t)u^m(y, t)dy, & x \in \partial\Omega, t > 0, \\ v(x, t) = \int_{\Omega} k_2(x, y, t)v^n(y, t)dy, & x \in \partial\Omega, t > 0, \\ u(x, 0) = u_0(x), v(x, 0) = v_0(x), & x \in \Omega, \end{cases} \quad (1)$$

где p, q, m, n — положительные константы, $\min(pq, m, n) > 1$, Ω — ограниченная область в $\mathbb{R}^N$, $N \geq 1$, с достаточно гладкой границей $\partial\Omega$, $c_1(x, t), c_2(x, t)$ — неотрицательные локально непрерывные по Гельдеру функции, определенные при $x \in \bar{\Omega}$, $t \geq 0$, $k_1(x, y, t), k_2(x, y, t)$ — неотрицательные непрерывные функции, определенные при $x \in \partial\Omega$, $y \in \bar{\Omega}$, $t \geq 0$, $u_0(x), v_0(x)$ — неотрицательные непрерывные функции, удовлетворяющие граничным условиям при $t = 0$.

Система (1) сформулирована из физических моделей, возникающих в различных областях прикладной науки. Например, она может быть интерпретирована как задача о теплопроводности с нелинейными нелокальными источниками на границе материального тела. В этом случае $u(x, t), v(x, t)$ представляют температуру взаимодействующих компонентов в процессе их изменения.

Локальное существование, вопросы единственности решения, а также принцип сравнения решений начально-краевой задачи (1) были рассмотрены в [1].

Будем говорить, что решение $(u(x, t), v(x, t))$ задачи (1) разрушается за конечное время, если существует такая положительная константа $T < \infty$, что

$$\lim_{t \rightarrow T-} (|u(\cdot, t)|_{L^\infty(\Omega)} + |v(\cdot, t)|_{L^\infty(\Omega)}) = +\infty.$$

В этом случае T называют временем разрушения решения.

Пусть φ — собственная функция задачи $\Delta\varphi + \lambda\varphi = 0$, $x \in \Omega$, $\varphi = 0$ для $x \in \partial\Omega$, соответствующая первому собственному значению λ , которая выбрана из условия $\int_\Omega \varphi(x)dx = 1$, $\varphi(x) > 0$ для $x \in \Omega$. Обозначим

$$\varphi_s = \max_{\Omega} \varphi(x), \quad (2)$$

$$\underline{c}_1(t) = \min_{\Omega} c_1(x, t), \underline{c}_2(t) = \min_{\Omega} c_2(x, t), \quad (3)$$

$$\underline{k}_1(t) = \frac{\lambda}{\varphi_s} \min_{\partial\Omega \times \bar{\Omega}} k_1(x, y, t), \underline{k}_2(t) = \frac{\lambda}{\varphi_s} \min_{\partial\Omega \times \bar{\Omega}} k_2(x, y, t). \quad (4)$$

Пусть

$$W_1(t) = \int_{\Omega} u(x, t)\varphi(x)dx, W_2(t) = \int_{\Omega} v(x, t)\varphi(x)dx. \quad (5)$$

Продифференцировав $W_1(t)$ по t и воспользовавшись формулой Грина, получим

$$\begin{aligned} W_1'(t) &= \int_{\Omega} u_t(x, t)\varphi(x)dx = \int_{\Omega} (\Delta u + c_1(x, t)v^p)\varphi dx = \\ &= \int_{\Omega} \Delta\varphi u dx + \int_{\partial\Omega} \frac{\partial u}{\partial n} \varphi ds - \int_{\partial\Omega} \frac{\partial \varphi}{\partial n} u ds + \int_{\Omega} c_1(x, t)v^p \varphi dx. \end{aligned}$$

Учитывая, что $\varphi(x) = 0$ для $x \in \partial\Omega$, равенство $\int_{\partial\Omega} \frac{\partial \varphi}{\partial n} ds = -\lambda$ и граничные условия в (1), имеем

$$\begin{aligned} W_1'(t) &= - \int_{\Omega} \lambda u \varphi dx - \int_{\partial\Omega} \frac{\partial \varphi}{\partial n} \left(\int_{\Omega} k_1(x, y, t) u^m(y, t) dy \right) ds + \int_{\Omega} c_1(x, t)v^p \varphi dx \geq \\ &\geq \int_{\Omega} (-\lambda u + \underline{k}_1(t)u^m + \underline{c}_1(t)v^p) \varphi dx. \end{aligned} \quad (6)$$

Проведя аналогичные преобразования, можно получить, что

$$W_2'(t) \geq \int_{\Omega} (-\lambda v + \underline{k}_2(t)v^n + \underline{c}_2(t)u^q) \varphi dx. \quad (7)$$

Для $\max(p, q, m, n) \geq 1$ рассмотрим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} f'(t) = -\lambda f(t) + \underline{k}_1^*(t)f^m(t) + \underline{c}_1^*(t)g^p(t), & t > 0, \\ g'(t) = -\lambda g(t) + \underline{k}_2^*(t)g^n(t) + \underline{c}_2^*(t)f^q(t), & t > 0, \\ f(0) = \int_{\Omega} u_0(x)\varphi(x)dx, g(0) = \int_{\Omega} v_0(x)\varphi(x)dx, \end{cases} \quad (8)$$

где $\underline{k}_1^*(t) = \underline{k}_1(t)$ при $m \geq 1$ и $\underline{k}_1^*(t) = 0$ при $m < 1$, $\underline{k}_2^*(t) = \underline{k}_2(t)$ при $n \geq 1$ и $\underline{k}_2^*(t) = 0$ при $n < 1$, $\underline{c}_1^*(t) = \underline{c}_1(t)$ при $p \geq 1$ и $\underline{c}_1^*(t) = 0$ при $p < 1$, $\underline{c}_2^*(t) = \underline{c}_2(t)$ при $q \geq 1$ и $\underline{c}_2^*(t) = 0$ при $q < 1$.

Теорема 1. Пусть $p \geq 1, q \geq 1, pq > 1$ или $\max(m, n) > 1$ и задача Коши (8) не имеет глобального решения. Тогда задача (1) не имеет нетривиального глобального решения.

Доказательство. Для определенности рассмотрим случай $p, q, m > 1, n < 1$. Доказательство для остальных случаев аналогично. Применив неравенство Йенсена к (6), (7), получим

$$W_1'(t) \geq \int_{\Omega} (-\lambda u + \underline{k}_1(t)u^m + \underline{c}_1(t)v^p)\varphi dx \geq -\lambda W_1(t) + \underline{k}_1(t)W_1^m(t) + \underline{k}_2(t)W_2^p(t),$$

$$W_2'(t) \geq \int_{\Omega} (-\lambda v + \underline{k}_2(t)v^n + \underline{c}_2(t)u^q)\varphi dx \geq -\lambda W_1(t) + \underline{c}_2(t)W_1^q(t).$$

Тогда из принципа сравнения решений для систем обыкновенных дифференциальных уравнений и условий теоремы следует, что задача (1) не имеет нетривиального неотрицательного глобального решения. ■

Замечание 1. Из Теоремы 1 мы можем получить условия отсутствия глобального решения задачи (1) для достаточно больших начальных данных. Например, легко увидеть, что при $m > 1$ и выполненном условии

$$W_1(\tau) > \left((m-1)\exp(-\lambda(1-m)\tau) \int_{\tau}^{\infty} k_1(t)\exp[(1-m)\lambda t]dt \right)^{-\frac{1}{m-1}}, \quad (9)$$

или $n > 1$ и

$$W_2(\tau) > \left((n-1)\exp(-\lambda(1-n)\tau) \int_{\tau}^{\infty} k_2(t)\exp[(1-n)\lambda t]dt \right)^{-\frac{1}{n-1}}, \quad (10)$$

где τ — некоторая неотрицательная константа, задача (1) не имеет нетривиального глобального решения.

Из (9) и (10) следует, что при $m > 1$ и

$$\int_0^{\infty} \underline{k}_1(t)\exp(\lambda(1-m)t)dt = \infty, \quad (11)$$

или при $n > 1$ и

$$\int_0^{\infty} \underline{k}_2(t)\exp(\lambda(1-n)t)dt = \infty, \quad (12)$$

задача (1) не имеет нетривиального глобального решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gladkov A.A Reaction-Diffusion System with Nonlinear Nonlocal Boundary Conditions // International Journal of Partial Differential Equations. 2014. V. 2014. Article ID 523656. 10 p.

**THE NONEXISTENCE OF GLOBAL SOLUTIONS OF INITIAL BOUNDARY
VALUE PROBLEMS FOR SYSTEMS OF SEMILINEAR PARABOLIC
EQUATIONS WITH NONLINEAR NONLOCAL BOUNDARY CONDITIONS**

A.I. Nikitin

graduate student, e-mail: ip.alexnikitin@gmail.com

Vitebsk State University n.a. P.M. Masherov

Abstract. We consider initial boundary value problem for a reaction-diffusion system with nonlinear and nonlocal boundary conditions and nonnegative initial data. We give sufficient conditions of nonexistence of global solutions for the case $\min(m, n) > 1$.

Keywords: parabolic equations, nonlinearity, nonlocality, reaction-diffusion.

О ПОСТРОЕНИИ НОВОГО КЛАССА КВАДРАТУРНЫХ ФОРМУЛ

Ю.В. Трубников

профессор, д.ф.-м.н, e-mail: yurii_trubnikov@mail.ru

И.А. Орехова

аспирант, e-mail: orehova85@gmail.com

ВГУ имени П.М. Машерова, г. Витебск, Республика Беларусь

Аннотация. Построен класс формул квадратуры, основанный на построении многочлена наилучшего приближения в пространстве L_1 . Полином наилучшего приближения в пространстве L_1 является интерполяционным, а узлами интерполяции являются корни полиномов Чебышёва второго рода.

Ключевые слова: аппроксимация в пространстве L_1 , многочлены Чебышёва, квадратурные формулы.

При изучении вопроса о построении оптимальных квадратурных формул можно выделить две основные концепции К.Ф. Гаусса и А.Н. Колмогорова. Одна из основных идей большинства методов численного интегрирования состоит в замене подынтегральной функции каким-либо интерполяционным многочленом. Авторами данной статьи построен класс квадратурных формул, основанный на построении полинома наилучшего приближения в пространстве L_1 . Полином наилучшего приближения в пространстве L_1 является интерполяционным, а узлами интерполяции являются корни полиномов Чебышёва второго рода.

Целью настоящей работы является нахождение экстремальных полиномов $P_n(x)$ для значений $n = 2, 3, \dots, 7$ и построение класса квадратурных формул

$$\int_{-1}^1 f(x)dx \approx \int_{-1}^1 P_n(x)dx.$$

Рассмотрим пространство $L_1 = L_1[a, b]$ суммируемых на промежутке $[a, b]$ функций с нормой

$$\|f\| = \int_a^b |f(x)|dx.$$

Пусть G — некоторое конечномерное подпространство пространства L_1 . Элементы этого подпространства будем называть полиномами.

Лемма 1. Пусть функции $f \in L_1$ и полином $\varphi \in G$ таковы, что равенство

$$\int_a^b h(x) \operatorname{sign}[f(x) - \varphi(x)]dx = 0 \quad (1)$$

выполняется для любой функции $h \in G$. Тогда φ есть полином наилучшего приближения (экстремальный полином) функции f в подпространстве G . Доказательство имеется в [1].

Факт, сформулированный в лемме 1, вытекает из того, что интеграл в левой части равенства (1) является значением субградиента нормы $\|f - \varphi\|$ на любом элементе $h \in G$.

Таким образом, для того чтобы эффективно применять для построения экстремального полинома равенство (1), необходимо знать (или уметь находить) чередование знаков такой функции, для которой равенство (1) выполнялось бы на G .

Если G — подпространство в $L_1[-1, 1]$, образованное функциями $1, x, x^2, \dots, x^{n-1}$, то такой функцией является полином Чебышёва второго рода

$$U_n(x) = \frac{\sin[(n+1) \arccos x]}{\sqrt{1-x^2}} \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (2)$$

Точками перемены знака полинома $U_n(x)$ являются значения

$$x_k = \cos \frac{k\pi}{n+1}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Лемма 2 [2]. Справедливы равенства

$$\int_{-1}^1 x^m \operatorname{sign}(U_n(x)) d(x) = 0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots, n-1). \quad (4)$$

Равенства (4) означают, что чередование знаков в точках x_k ($k = 1, 2, \dots, n$) обеспечивает равенство (1) на подпространстве G , образованном функциями $1, x, x^2, \dots, x^{n-1}$.

Приведём для удобства читателя следующую теорему.

Теорема [1]. Пусть $f \in L_1[-1, 1]$ и P_{n-1} — полином степени не выше $n-1$. Если точки

$$x_k = \cos \frac{k\pi}{n+1} \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

— это все точки перемены знака разности $f - P_{n-1}$ на $(-1, 1)$, то P_{n-1} — есть полином наилучшего приближения в пространстве L_1 функции f .

Таким образом, для применения данной теоремы требуется находить интерполяционный полином

$$P_{n-1}(x_k) = f(x_k) \quad (k = 1, 2, \dots, n). \quad (5)$$

Тогда точки x_k являются корнями разности $f(x) - P_{n-1}(x)$. Если окажется, что они являются точками перемены знака этой разности и других точек перемены знака на $(-1, 1)$ нет, то $P_{n-1}(x)$ и есть экстремальный полином.

Основные результаты работы отражены в следующих теоремах.

Теорема 1. Пусть функция f удовлетворяет условиям теоремы из [1, с.40]. Тогда справедливы следующие равенства

$$P_2(x) = \frac{1}{2} \left(\sqrt{2}x + 2x^2 \right) f_1 + (1 - 2x^2)f_2 - \frac{1}{2} \left(\sqrt{2}x - 2x^2 \right) f_3,$$

где

$$f_k = f \left[\cos \left(\frac{k\pi}{4} \right) \right] \quad (k = 1, 2, 3)$$

$$P_3(x) = c_1 f_1 + c_2 f_2 + c_3 f_3 + c_4 f_4,$$

где

$$c_1 = \frac{1}{160} [(\sqrt{5} - 5)(1 + \sqrt{5} + 4x)(\sqrt{5} - 1 - 4x)(\sqrt{5} - 1 + 4x)],$$

$$c_2 = \frac{1}{160} [(\sqrt{5} + 5)(1 + \sqrt{5} - 4x)(\sqrt{5} - 1 + 4x)(\sqrt{5} + 1 + 4x)],$$

$$c_3 = \frac{1}{160} [(\sqrt{5} + 5)(1 + \sqrt{5} + 4x)(\sqrt{5} - 1 - 4x)(\sqrt{5} + 1 - 4x)],$$

$$c_4 = \frac{1}{160} [(\sqrt{5} - 5)(1 + \sqrt{5} - 4x)(\sqrt{5} - 1 + 4x)(\sqrt{5} - 1 - 4x)],$$

$$f_k = f \left[\cos \left(\frac{k\pi}{5} \right) \right] \quad (k = 1, 2, 3, 4);$$

$$P_4(x) = f_3 + \frac{\sqrt{3}}{6} \left(-f_1 + 3\sqrt{3}f_2 - 3\sqrt{3}f_4 + f_5 \right) x +$$

$$+ \left(-\frac{1}{3}f_1 + 3f_2 - \frac{16}{3}f_3 + 3f_4 - \frac{1}{3}f_5 \right) x^2 -$$

$$- \frac{2\sqrt{3}}{3} \left(-f_1 + \sqrt{3}f_2 - \sqrt{3}f_4 + f_5 \right) x^3 + \left(\frac{4}{3}f_1 - 4f_2 + \frac{16}{3}f_3 - 4f_4 + \frac{4}{3}f_5 \right) x^4;$$

$$f_k = f \left[\cos \left(\frac{k\pi}{6} \right) \right] \quad (k = 1, 2, \dots, 5);$$

$$P_5(x) = 0,0298f_1 - 0,1401f_2 + 0,6102f_3 + 0,6102f_4 -$$

$$-0,1401f_5 + 0,0298f_6 - 83,592(-0,0004f_1 +$$

$$+0,0027f_2 - 0,0328f_3 + 0,0328f_4 - 0,0027f_5 +$$

$$+0,0004f_6)x - 83,592(-0,0359f_5 + 0,0277f_3 +$$

$$+0,0277f_4 - 0,0359f_2 + 0,0081f_1 + 0,0081f_6)x^2 -$$

$$-83,5918(0,009f_1 - 0,0576f_2 + 0,1248f_3 -$$

$$-0,1248f_4 + 0,0575f_5 - 0,009f_6)x^3 -$$

$$-83,5918(-0,0231f_4 - 0,0231f_3 + 0,0416f_5 +$$

$$+0,0417f_2 - 0,0185f_6 - 0,0185f_1)x^4 -$$

$$-83,592(-0,0206f_1 + 0,0669f_2 - 0,1039f_3 +$$

$$\begin{aligned}
& +0,1039f_4 - 0,0668f_5 + 0,0205f_6)x^5; \\
P_6(x) = & f_4 + \frac{\sqrt{2}-1}{2}[\sqrt{2-\sqrt{2}}(f_1-f_7) + \\
& + (\sqrt{2}-2)(2\sqrt{2}+3)(f_2-f_6) + \sqrt{2-\sqrt{2}} \times \\
& \times (5\sqrt{2}+7)(f_3-f_5)]x + [(3-2\sqrt{2})(f_1+f_7) - f_2 + \\
& + (3-2\sqrt{2})(12\sqrt{2}+17)(f_3+f_5) - 10f_4 - f_6]x^2 + \\
& + (3-2\sqrt{2})(12\sqrt{2}+17)(f_3+f_5) - 10f_4 - f_6]x^2 + \\
& + (2\sqrt{2}-1)[- \sqrt{2-\sqrt{2}}(f_1-f_7) + \frac{4}{7}(2-\sqrt{2}) \times \\
& \times (3\sqrt{2}+5)(f_2-f_6) - \frac{1}{7}\sqrt{2-\sqrt{2}}(13\sqrt{2}+17)(f_3-f_5)]x^3 + \\
& + [(6\sqrt{2}-10)(f_1+f_7) + 8(f_2+f_6) + \frac{2}{7}(3\sqrt{2}-5) \times \\
& \times (30\sqrt{2}+43)(f_3+f_5) + 24f_4]x^4 + \\
& + [2\sqrt{2}\sqrt{2-\sqrt{2}}(f_1-f_7) - 4\sqrt{2}(f_2-f_6) + \\
& + 2\sqrt{2}\sqrt{2-\sqrt{2}}(\sqrt{2}+1)(f_3-f_5)]x^5 + [(8-4\sqrt{2}) \times \\
& \times (f_1+f_7) - 8(f_2+f_6) + 4(2-\sqrt{2})(2\sqrt{2}+3)(f_3+f_5)]x^6,
\end{aligned}$$

где

$$f_k = f \left[\cos \left(\frac{k\pi}{8} \right) \right] \quad (k = 1, 2, \dots, 7).$$

Заметим, что, так как

$$f \left[\cos \left(\frac{k\pi}{7} \right) \right] \quad (k = 1, 2, \dots, 6)$$

не выражаются в радикалах, то коэффициенты полинома $P_5(x)$ получаются весьма громоздкими или могут быть выражены в численном виде.

Доказательство теоремы 1 состоит в явном решении соответствующих систем линейных уравнений для построения интерполяционного полинома.

Теорема 2. Справедливы равенства

$$\int_{-1}^1 P_2(x) dx = \frac{2}{3}(f_1 + f_2 + f_3);$$

$$\int_{-1}^1 P_3(x) dx = -\frac{1}{30}[(\sqrt{5}-15)(f_1+f_4) - (\sqrt{5}+15)(f_2+f_3)];$$

$$\int_{-1}^1 P_4(x) dx = \frac{2}{45}[7(f_1+f_5) + 9(f_2+f_4) + 13f_3];$$

$$\int_{-1}^1 P_5(x) dx = 0,2269(f_1+f_6) + 0,3268(f_2+f_5) + 0,4463(f_3+f_4);$$

$$+(257+120\sqrt{2})(f_3+f_5) + (285+76\sqrt{2})f_4].$$

В качестве оценки выступает

$$\left| \int_{-1}^1 f(x) \operatorname{sign} U_{n+1}(x) dx \right|.$$

где U_{n+1} — полиномы Чебышева 2-го рода.

Основным результатом работы являются сформулированные: теорема 1 о виде полинома наилучшего приближения в пространстве L_1 и теорема 2 о виде соответствующей квадратурной формулы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Даугавет И.К. Введение в теорию приближения функции. Ленинград: Изд. Ленинградского ун-та, 1977. 183 с.
2. Суетин П.К. Классические ортогональные многочлены. М.: Наука, 1979. 416 с.

ON THE CONSTRUCTION OF A NEW CLASS OF QUADRATURE FORMULAS

Y.V. Trubnikov

Professor, Doctor of Mathematics, e-mail: yurii_trubnikov@mail.ru

I.A. Orekhova

Graduate student, e-mail: orehova85@gmail.com

Educational establishment «Vitebsk State University named after P.M. Masherov»

Abstract. The class of quadrature formulas based on the construction of the polynomial of best approximation in the space L_1 is constucted. Polynomial of best approximation in the space L_1 is an interpolation and interpolation nodes are the roots of the Chebyshev polynomials of the second kind.

Keywords: approximation in the space L_1 , Chebyshev polynomials, roots of the Chebyshev polynomials of the second kind, formulas of quadrature.

HOW TO MAKE ELEMENTARY GEOMETRY MORE ROBUST AND THUS, MORE PRACTICAL: GENERAL ALGORITHMS

O. Kosheleva

Ph.D. (Math.), Associate Professor, e-mail: olgak@utep.edu

University of Texas at El Paso, El Paso, TX 79968, USA

Abstract. Many results of elementary geometry assume *exact equality* between some angles or distances. In practical geometric configurations, however, we only have *approximate equality*. In such situations, traditional results do not allow us to make any conclusions. To make elementary geometry more practical, it is therefore necessary to make it more robust, i.e., applicable also to situations when we have approximate equality. The need for such robust versions of geometric results is well understood, and many such versions are known. In this talk, we provide general algorithms for generating such robust results.

Keywords: elementary geometry, robust geometry, practical applications of geometry, geometric algorithms.

1. Formulation of the Problem

At first glance, geometry is very practical. In contrast to more abstract notions of algebra, elementary geometry looks very practical. Many geometric shapes that we study in elementary geometry are frequently encountered in the real world: a sheet of paper is a rectangle, a can is approximately a cylinder, a football is a sphere, etc. Indeed, all the textbooks like to emphasize that the very name of geometry – which, in Greek, means “measuring Earth” – indicate that it started as a very practical discipline. So, at first glance, it looks like geometry is very practical.

In the first approximation, we can indeed apply geometric results to the real world. For example, according to the Pythagoras Theorem, the hypotenuse AC of a right triangle is equal to $\sqrt{AB^2 + BC^2}$. Thus, when we have a real-life figure of the triangular shape, one of its angles B is right (90°), and we know the adjacent sides AB and BC , then we can use Pythagoras Theorem to compute the length AC of the third side.

If we have a real-life figure of triangular shape, and we know that its two sides AB and AC are equal, then we can conclude that the corresponding angles B and C are equal too – thus, it is sufficient to measure just one of these angles.

Elementary geometry is about ideal objects, and real-life objects are not ideal. Elementary geometry is about ideal bodies and shapes, and real-life objects are rarely ideal. In the first approximation, the angle between the lines AB and BC may be close to 90° , but the real-life angle is never exactly equal to 90° , it is usually somewhat different.

Similarly, we may have points A , B , and C for which AB is close to AC , but in real life, the sides AB and AC are never exactly equal.

Need to make elementary geometry more robust and thus, more practical. Elementary geometry states that when the angle B is equal to exactly 90° , then $AC = \sqrt{AB^2 + BC^2}$. Traditional elementary geometry, however, says nothing about the cases when the angle is *close* to 90° .

Intuitively, it makes sense to expect that if the angle is close to 90° , then AC should be close to $\sqrt{AB^2 + BC^2}$, but the traditional elementary geometry results do not tell us how close these two values will be.

Thus, to make elementary geometry more practically useful, it is desirable to make its result more *robust*, i.e., valid even when conditions are only approximately true.

What is known and what we do in this paper. The need to make geometry more robust is well understood. There are many research papers and books that show how to make different *specific* geometric constructions more robust; see, e.g., [1, 3–7].

In this paper, we provide *general* algorithms for generating such robust results.

2. Analysis of the Problem

What we do in this section. Our goal is to make geometric results more practical. To do that, we will recall the typical structure of the current geometric results, and the typical practical problems for which such results can be useful.

At first, we will describe both the results and the practical problems in commonsense terms. Then, we show how these commonsense descriptions can be reformulated in precise terms. Once such a precise description is formulated, we will be ready to state our main results.

Typical structure of results from elementary geometry: brief reminder. In elementary geometry, there are two types of results.

Some of the geometric results simply describe consequences, *without* invoking any *constructions*. For example, the Pythagoras Theorem says that if A , B , and C are three different points, and the angle $\angle ABC$ is equal to 90° , then $AC^2 = AB^2 + BC^2$. In general, results of this type state that if some property $P(x)$ is satisfied for a geometric object x (or for a combination of geometric objects x), then for this object x (or combination of objects) some other property $Q(x)$ is satisfied as well:

$$\forall x (P(x) \Rightarrow Q(x)).$$

Other geometric results describe the possibility of constructing new objects. As an example, we can have a simple result that for every rectangle, there exists a

point which is equidistant from all four vertices of this rectangle. Another example is the result that if two points are different, then there exists a straight line that goes through these two points. In general, results of this type state that if some property $P(x)$ is satisfied for a geometric object x (or for a combination x of geometric objects), then there exists an object y such that the pair (x, y) satisfies some property $Q(x, y)$:

$$\forall x (P(x) \Rightarrow \exists y Q(x, y)).$$

Most other geometric results can be reformulated in these terms. For example, the results about *uniqueness* of an object x satisfying a certain property $P(x)$ (e.g., of a line that passes through two given points $A \neq B$) can be reformulated as follows: if we have a pair of objects (x, x') for which $P(x)$ and $P(x')$ are both true, then $x = x'$:

$$\forall (x, x') ((P(x) \& P(x')) \Rightarrow x = x').$$

Typical practical problems: brief reminder. In relation to each geometric result, two types of practical problems are possible.

It can be that we have an object x for which the property $P(x)$ is “approximately” satisfied – in some reasonable sense. In this case, we expect that the resulting property $Q(x)$ is also approximately satisfied – or, for results with construction, that there exists an object y for which $Q(x, y)$ is approximately satisfied. For such problems, we would like to know how accurately $Q(x)$ will be satisfied, and – in the case of construction results – how to construct the corresponding object y .

We will call such problems *forward problems*. The reason for this name is that in this problem, we follow the direction of the original implication result: we know that $P(x)$ implies $Q(x)$, and we want to transform accuracy with which the property $P(x)$ is satisfied into an accuracy with which the property $Q(x)$ is satisfied.

Another practical situation is when $Q(x)$ is the property that we want to achieve. In this case, due to the implication $P(x) \Rightarrow Q(x)$, we know that if we guarantee the property $P(x)$, then $Q(x)$ will also be true. A related question is: if we want to guarantee $Q(x)$ with some accuracy, how accurately do we need to satisfy the property $P(x)$?

In these problems, the desired direction is opposite to the direction of the implication: we know that $P(x)$ implies $Q(x)$, and we want to transform accuracy with which the property $Q(x)$ should be satisfied into an accuracy with which the property $P(x)$ should be satisfied. Because of this opposite, we will call such problems *inverse problems*.

Comment. In relation to inverse problems, it is worth mentioning that while for some parts of the property $Q(x)$, it makes sense to require that these parts should be satisfied with some accuracy, other parts may need to be satisfied exactly.

For example, when we use geometry in design, it is important to make sure that two different parts of the design do not occupy the same point in space –

otherwise, this design is not feasible. The corresponding requirement is that the distance $d(A, B)$ between the sets A and B forming the parts should be positive: $d(A, B) > 0$. This is an *absolute* requirement: if we only require that an *approximate* inequality $d(A, B) \geq -\varepsilon$ is satisfied, then we may have $d(A, B) = 0$, i.e., A and B having a common point.

In general, solving an inverse problem can be reduced to solving a few forward problems. If we can solve forward problems, then we can also algorithmically solve inverse problems. For example, to find the accuracy δ that would guarantee that the conclusion is satisfied with a given accuracy ε , we should check different values of δ until we find the largest value Δ of the accuracy δ that still provides the desired accuracy ε .

This can be done very efficiently by *bisection*: we start with some large value $\bar{\delta}$ for which the resulting inaccuracy is larger than ε . Then, we know that the desired largest Δ is somewhere in the interval $[\underline{\delta}, \bar{\delta}]$, with $\underline{\delta} = 0$. On each iteration step, we apply the forward problem to the midpoint $m = \frac{\underline{\delta} + \bar{\delta}}{2}$.

- If for this midpoint m , we get the desired accuracy ε , this means that

$$\Delta \in [m, \bar{\delta}].$$

- If for m , the inaccuracy is too high, this means that $\Delta \in [0, m]$.

In both cases, we shrank the width of the interval by a factor of 2. Thus, in k iterations, we get a new interval whose width is 2^{-k} of the original one. The midpoint of this interval provides a $2^{-(k+1)}$ -accurate estimate for Δ . So, in a few iterations, we get a very accurate solution to the inverse problem.

Because of this reduction, in this paper, we will only consider algorithms for solving the forward problem.

From common-sense description of results and problems to a precise description. Our description of geometric results and practical problems talks about objects, properties of objects, and the possibility to satisfy such properties with some accuracy. Thus, to make our descriptions precise, we must formulate, in precise terms,

- what is a geometric object,
- what do we mean by properties of geometric objects, and
- what does it mean for some property to be satisfied with a given accuracy.

Let us provide these three formulations one by one.

What is a geometric object: towards a precise description. In elementary geometry, we deal with basic objects such as points, straight lines, planes, line segments, polygons, polyhedra, circles, spheres, arcs, etc.

Each such object can be naturally described by finitely many real-valued parameters. For example:

- a point on the plane can be described by its two coordinates;
- a point in the 3-D space can be described by its three coordinates;
- a circle or a sphere can be uniquely described by its center (a 2-D or 3-D point) and a non-negative radius;
- a polygon can be described by a sequence of vertices (2-D points);
- a polyhedron can be described by its faces, and each face can be described by a sequence of its vertices (3-D points), etc.

From this viewpoint, in the following text, by a geometric object, we will understand a tuple $x = (x_1, x_2, \dots)$ consisting of several real numbers.

Properties of geometric objects can usually be reformulated in terms of geometric quantities. Most basic geometric properties can be reformulated as equalities or inequalities between geometric quantities characterizing the corresponding object(s), properties such as:

- the distance between the two points,
- the angle between two directions,
- the area of a given polygon, etc.

Geometric quantities: towards a precise description. Geometric quantities are – whenever they are defined – continuous (and computable) functions of the corresponding parameters. For example:

- the distance $d(x, y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + (x_3 - y_3)^2}$ between two 3-D points x and y is a continuous function of the corresponding coordinates x_i and y_i ;
- the angle $\alpha = \angle ABC$ which is formed by directions AB and BC at the point B can be obtained from the cosine theorem $AC^2 = AB^2 + BC^2 - 2AB \cdot BC \cdot \cos(\alpha)$ and is, thus, also continuous wherever it is defined, etc.

A general description of a geometric quantity $f(x)$ is that it is a continuous and computable function of the tuple x . The precise notion of a continuous function is well-known. In contrast, the notion of a computable function is less known; so, for reader's convenience, we briefly describe the corresponding notion in the Appendix to this paper.

Properties of geometric objects: towards a precise description. The main reason we formally described what is a geometric *quantity* is that we want to describe geometric *properties*, and most basic geometric properties are equalities or inequalities between geometric quantities.

Basic geometric properties. Some basic geometric properties are naturally described as *equalities* (=) between quantities. For example:

- If two sides of the triangle are equal, then the corresponding angles are equal as well.
- If an angle is equal to 90° , then AC^2 is equal to $AB^2 + BC^2$, etc.

Some basic geometric properties deal with *non-equality* ($\neq$). For example, if two points A and B are different ($A \neq B$), then there exists one and only one line passing through both points.

Some basic geometric properties deal with *non-strict equality* ($\leq$ or $\geq$). For example, the triangle inequality states that for every three points A , B , and C , we have $AC \leq AB + BC$.

Some basic geometric properties deal with *strict equality* ($<$ or $>$): for example, there are results about triangles with acute angles, i.e., with angles which are smaller than 90° .

In general, a basic geometric property is either an equality between quantities $f(x) = g(x)$, or an inequality such as $f(x) \neq g(x)$, $f(x) \leq g(x)$, or $f(x) < g(x)$.

General geometric properties. Many geometric results require that *several* basic geometric properties $P_1(x), \dots, P_m(x)$ are satisfied. In this case, the corresponding property $P(x)$ has the form $P_1(x) \& \dots \& P_m(x)$.

Properties $Q(x)$ (or $Q(x, y)$) in the conclusion part may be even more complex, since it may be that instead of single property, the corresponding geometric theorem states that *one of* several alternatives is possible – e.g., that a triangle is:

- *either* a right triangle (with one of the angles equal to 90°),
- *or* an acute triangle (with all angles smaller than 90°),
- *or* an obtuse triangle (with one of the angles larger than 90°).

In general, such properties have a form $Q_1(x) \vee \dots \vee Q_p(x)$, where each $Q_i(x)$ has the form $Q_{i1}(x) \& \dots \& Q_{in_i}(x)$, and $Q_{ij}(x)$ are basic geometric properties. Such formulas are known as *formulas in DNF* (Disjunctive Normal Form).

What does it mean for a property to be satisfied with a given accuracy $\varepsilon > 0$. Let us start with a simple example of the property: the property $P(A, B)$ that the two points A and B are equal. In terms of geometric quantities, this property has a simple equality form $d(A, B) = 0$. In this case, it is reasonable to say that this property is satisfied with accuracy ε if $d(A, B) \leq \varepsilon$.

If we consider two points on an oriented line, then we can consider a directed distance $d_{\rightarrow}(A, B)$ which can be positive or negative depending on whether the direction AB coincides with the given direction on this line or not. In this case, it is reasonable to say that this property is satisfied with accuracy ε if $|d_{\rightarrow}(A, B)| \leq \varepsilon$.

In general, we say that the property $f(x) = g(x)$ is satisfied with accuracy ε if $|f(x) - g(x)| \leq \varepsilon$.

If the property is that B is on the right side of A , i.e., that $d_{\rightarrow}(A, B) \geq 0$, then it is reasonable to say that this property is satisfied with accuracy ε if B is ε -close to the right side of A , i.e., that $d_{\rightarrow}(A, B) \geq -\varepsilon$.

Alternatively, we can understand approximate satisfaction of this property as stating that even if the directed distance $d_{\rightarrow}(A, B)$ is the result of measuring the actual (unknown) directed distance with accuracy ε , we can still guarantee that B is actually on the right side of A . In this case, the corresponding property is approximately satisfied if $d_{\rightarrow}(A, B) \geq \varepsilon$.

In general, for a property $f(x) \geq g(x)$, we can have either $f(x) \geq g(x) - \varepsilon$ or $f(x) \geq g(x) + \varepsilon$.

Which of the two definitions to select depends on the practical problem:

- If we know $P(x)$ approximately, and we want to know how approximately we can conclude $Q(x)$, then it is reasonable to use the approximation $f(x) \geq g(x) - \varepsilon$.
- On the other hand, if we want to *guarantee* the property $Q(x)$ of the form $f(x) \geq g(x)$, then it makes sense to consider an inequality $f(x) \geq g(x) + \varepsilon$ which indeed guarantees that $f(x) \geq g(x)$.

Important fact about strict inequalities. It is important to note that the choice between two formalizations is possible only for *non-strict* inequalities $\leq$ or $\geq$. For *strict* inequalities ($<$ or $>$) there is no choice. Indeed, e.g., if $f(x) \geq 0$ implies that $g(x) \geq 0$, then it is reasonable to expect that for sufficiently small ε , if $f(x) \geq -\varepsilon$, then $g(x)$ is also either non-negative or close to a non-negative number.

On the other hand, if $f(x) > 0$ implies some property $Q(x)$, then it is not always reasonable to expect that this property will be approximately satisfied when $f(x) \geq -\varepsilon$ (or even when $f(x) \geq 0$). For example, if $f(x)$ is a distance from a point x to the unit disk (interior of the unit circle), then the condition $f(x) > 0$ describes all the points x outside the disk, while the condition $f(x) \geq 0$ describes all the points on the plane.

Need to consider bounded regions in practical problems. Elementary geometry deals with potentially *infinite* lines, potentially infinite planes, etc. In practice, we always deal with a *bounded* region of space. In this bounded region of space, all the parameters $x_1, x_2, \dots$ describing a geometric object are bounded by some constants $\underline{b}_i$ and $\bar{b}_i$: $\underline{b}_i \leq x_i \leq \bar{b}_i$. In other words, we only consider tuples $x = (x_1, x_2, \dots)$ from the corresponding box $B = [\underline{b}_1, \bar{b}_1] \times [\underline{b}_2, \bar{b}_2] \times \dots$, and the corresponding geometric results of the type

$$\forall x \in B (P(x) \Rightarrow Q(x)).$$

Similarly, from the practical viewpoint, we are only interested in constructed objects y from a certain bounded region Y , so the corresponding geometric results will have a form

$$\forall x \in B (P(x) \Rightarrow \exists y \in Y Q(x, y)).$$

Comment. There is also a theoretical need to restrict ourselves to bounded domains, a need which is easy to explain on the following simple geometric example. If two

lines ℓ and ℓ' are parallel, then for every two points $A, A' \in \ell$, the distances from these points to the line ℓ' are exactly the same: $d(A, \ell') = d(A', \ell')$.

In practice, lines are never *exactly* parallel, they are *approximately* parallel. If ℓ' is approximately parallel to ℓ , and close enough to being parallel, then within each bounded region B , the difference $d(A, \ell') - d(A', \ell')$ is still small. However, if we consider the whole plane (or the whole 3-D space), then, no matter how small the deviation from parallelism, the difference $d(A, \ell') - d(A', \ell')$ grows to infinity if we consider points A and A' which are further and further away.

In other words, to properly formulate the robustness property, we need to restrict ourselves to bounded regions.

Now, we are ready to formulate the main results.

3. Definitions and Results

3.1. General Definitions

Definition 1. By a geometric object x (or a combination of geometric objects), we mean a tuple of real numbers $x = (x_1, x_2, \dots)$.

Definition 2. By a geometric quantity $f(x)$, we mean a computable and continuous function of several variables x .

Definition 3.

- By a basic geometric property, we mean a property of one of the types

$$f(x) = g(x), \quad f(x) \neq g(x), \quad f(x) \leq g(x), \quad \text{or} \quad f(x) < g(x).$$

- By a geometric property of type $\mathcal{P}$, we mean a property of the type $P_1(x) \& \dots \& P_m(x)$, where all $P_i(x)$ are basic geometric properties.
- By a geometric property of type $\mathcal{Q}$, we mean a property of the type

$$Q_1(x) \vee \dots \vee Q_m(x),$$

where all $Q_i(x)$ are geometric properties of type $\mathcal{P}$.

Comment. In this definition, we do not explicitly list basic geometric properties of the type $f(x) \geq g(x)$ and $f(x) > g(x)$, since they can be reformulated in the form $g(x) \leq f(x)$ or, accordingly, $g(x) < f(x)$.

Definition 4. Let $P(x) \stackrel{\text{def}}{=} P_1(x) \& \dots \& P_m(x)$ be a geometric property of type $\mathcal{P}$, let $\delta = (\delta_1, \dots, \delta_m)$ be a tuple of computable positive numbers, and let x be a computable geometric object. We say that the geometric property $P(x)$ is satisfied with accuracy δ if the object x satisfies the property $P^\delta(x) \stackrel{\text{def}}{=} P_1^\delta(x) \& \dots \& P_m^\delta(x)$, where for every i :

- if $P_i(x)$ has the form $f_i(x) = g_i(x)$, then the property $P_i^\delta(x)$ has the form

$$|f_i(x) - g_i(x)| \leq \delta_i;$$

- if $P_i(x)$ has the form $f_i(x) \neq g_i(x)$, then the property $P_i^\delta(x)$ has the form

$$|f_i(x) - g_i(x)| \geq \delta_i;$$

- if $P_i(x)$ has the form $f_i(x) \leq g_i(x)$, then the property $P_i^\delta(x)$ has the form

$$f_i(x) \leq g_i(x) + \delta_i;$$

- if $P_i(x)$ has the form $f_i(x) < g_i(x)$, then the property $P_i^\delta(x)$ has the form

$$f_i(x) \leq g_i(x) - \delta_i.$$

Definition 5. Let $Q(x) \stackrel{\text{def}}{=} Q_1(x) \vee \dots \vee Q_m(x)$ be a geometric property of type $\mathcal{Q}$, where $Q_i(x) = Q_{i1}(x) \& Q_{i2}(x) \& \dots$, let $\varepsilon > 0$ be a computable positive number, and let x be a computable geometric object. We say that the geometric property $Q(x)$ is satisfied with accuracy ε is the object x satisfies the property $Q^\varepsilon(x) \stackrel{\text{def}}{=} Q_1^\varepsilon(x) \vee \dots \vee Q_m^\varepsilon(x)$, where $Q_i^\varepsilon(x) = Q_{i1}^\varepsilon(x) \& Q_{i2}^\varepsilon(x) \& \dots$, and for every i and j :

- if $Q_{ij}(x)$ has the form $f_{ij}(x) = g_{ij}(x)$, then $Q_{ij}^\varepsilon(x)$ has the form

$$|f_{ij}(x) - g_{ij}(x)| \leq \varepsilon;$$

- if $Q_{ij}(x)$ has the form $f_{ij}(x) \neq g_{ij}(x)$, then no inequality need to be satisfied;
- if $Q_{ij}(x)$ has the form $f_{ij}(x) \leq g_{ij}(x)$ or $f_{ij}(x) < g_{ij}(x)$, then $Q_{ij}^\varepsilon(x)$ has the form $f_{ij}(x) \leq g_{ij}(x) + \varepsilon$.

3.2. Case of No Constructions

Proposition 1. Let $P(x)$ be a geometric property of type $\mathcal{P}$, $Q(x)$ be a geometric property of type $\mathcal{Q}$, and let B be a box. Then, for each tuple δ , there exists an $\varepsilon > 0$ for which $\forall x \in B (P^\delta(x) \Rightarrow Q^\varepsilon(x))$. Moreover, there exists the smallest non-negative number ε for which this implication holds.

Comment. For reader's convenience, all the proofs are placed in the special Proofs sections.

Notation. For each $P(x)$, $Q(x)$, B , and δ , the smallest number ε for which the implication $\forall x \in B (P^\delta(x) \Rightarrow Q^\varepsilon(x))$ holds will be denoted by $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta)$.

Proposition 2. If $\forall x \in B (P(x) \Rightarrow Q(x))$, then $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta) \rightarrow 0$ as $\delta \rightarrow 0$.

Comment. Replacing an equality $f_i(x) = g_i(x)$ with an inequality $|f_i(x) - g_i(x)| \leq \delta_i$ weakens the original condition (makes it more general and easier to satisfy).

On the other hand, replacing the condition $f_i(x) \neq g_i(x)$ with the inequality $|f_i(x) - g_i(x)| \geq \delta_i > 0$ makes the condition stronger. Can we leave such conditions $f_i(x) \neq g_i(x)$ intact and still get meaningful results – e.g., Proposition 2? A simple example shows that this is not possible.

As such an example, let us consider the historically first use of Pythagoras theorem – to make sure that the angle is right. The corresponding geometric result states that if $AB \neq 0$, $BC \neq 0$, and $AC^2 = AB^2 + BC^2$, then the angle at B is equal to 90 degrees.

Our result states that if $AB \geq \delta_1 > 0$, $BC \geq \delta_2 > 0$, and $|AC^2 - AB^2 - BC^2| \leq \delta_3 > 0$, then the angle at the vertex B is close to 90° , and the difference between the actual angle and 90° tends to 0 when $\delta_i \rightarrow 0$.

On the other hand, if we simply keep the inequalities $AB \neq 0$ and $BC \neq 0$, and only replace the equality with the corresponding inequality $|AC^2 - AB^2 - BC^2| \leq \delta_3 > 0$, then we would not be able to say anything about the angle at B – because we could take any triangle, with any angles, shrink to a small enough size, and the inequality $|AC^2 - AB^2 - BC^2| \leq \delta_3$ will be trivially satisfied, simply because all three sides AB , BC , and AC are very small.

Discussion. The value $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta)$ is the smallest number ε for which, if the geometric property $P(x)$ is satisfied with accuracy δ , then the geometric property $Q(x)$ is satisfied with accuracy ε . In other words, this number characterizes the “degree of robustness” of the original result $\forall x \in B (P(x) \Rightarrow Q(x))$ to the fact that the geometric property $P(x)$ may only be satisfied with a (given) accuracy δ .

The following result shows how to compute this “degree of robustness” $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta)$.

Definition 6. For any real number $\eta > 0$, we say that the tuples $\delta = (\delta_1, \delta_2, \dots)$ and $\delta' = (\delta'_1, \delta'_2, \dots)$ are η -close if $|\delta_i - \delta'_i| \leq \eta$ for all i .

Theorem 1. There exists an algorithm that:

- given a geometric property P of type $\mathcal{P}$, a geometric property Q of type $\mathcal{Q}$, a computable box B , a computable tuple δ , and a computable number $\eta > 0$,
- returns computable real numbers ε' and ε'' for which $\varepsilon'' \leq \varepsilon_{P,Q,B}(\delta) \leq \varepsilon'$ and for which $\varepsilon' = \varepsilon_{P,Q,B}(\delta')$ and $\varepsilon'' = \varepsilon_{P,Q,B}(\delta'')$ for some tuples δ' and δ'' which are η -close to δ .

Discussion. In other words, we can compute the desired degree of robustness with an arbitrary accuracy.

Comment. The fact that we are allowing to slightly change the values δ_i is OK from the practical viewpoint, since in practice, we usually only know the accuracies δ_i themselves with some uncertainty. From the theoretical viewpoint, something like this is inevitable, because the exact computation of the “degree of robustness” $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta)$ is not always algorithmically possible:

Proposition 3. *No algorithm is possible that, given a geometric property P of type $\mathcal{P}$, a geometric property Q of type $\mathcal{Q}$, a computable box B , and a computable tuple δ , always computes the value $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta)$.*

Comment. It should be mentioned that even when an algorithm for computing $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta)$ is possible, this algorithm may take a very long time. For example, in the situation when we have no conditions $P(x)$, and $Q(x)$ consists of a simple equality $g(x) = 0$ for some non-negative function $g(x)$, the problem of computing the value $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta)$ becomes the problem of computing the maximum of a computable non-negative function $g(x)$ on a given box B . This problem is known to be NP-hard; see, e.g., [2, 8].

3.3. Case of Constructions

Proposition 4. *Let $P(x)$ be a geometric property of type $\mathcal{P}$, $Q(x, y)$ be a geometric property of type $\mathcal{Q}$, and let B and Y be boxes. Then, for each tuple δ , there exists an $\varepsilon > 0$ for which $\forall x \in B (P^\delta(x) \Rightarrow \exists y \in Y Q^\varepsilon(x, y))$. Moreover, there exists the smallest non-negative number ε for which this implication holds.*

Notation. *For each $P(x)$, $Q(x, y)$, B , Y , and δ , the smallest number ε for which the implication $\forall x \in B (P^\delta(x) \Rightarrow \exists y \in Y Q^\varepsilon(x, y))$ holds will be denoted by $\varepsilon_{P,Q,B,Y}(\delta)$.*

Proposition 5. *If $\forall x \in B (P(x) \Rightarrow \exists y \in Y Q(x, y))$, then $\varepsilon_{P,Q,B,Y}(\delta) \rightarrow 0$ as $\delta \rightarrow 0$.*

Theorem 2. *There exists an algorithm that:*

- *given a geometric property P of type $\mathcal{P}$, a geometric property Q of type $\mathcal{Q}$, computable boxes B and Y , a computable tuple δ , and a computable number $\eta > 0$,*
- *returns computable real numbers ε' and ε'' for which $\varepsilon'' \leq \varepsilon_{P,Q,B,Y}(\delta) \leq \varepsilon'$ and for which $\varepsilon' = \varepsilon_{P,Q,B,Y}(\delta')$ and $\varepsilon'' = \varepsilon_{P,Q,B,Y}(\delta'')$ for some tuples δ' and δ'' which are η -close to δ .*

Comment. In this result, we simply return the corresponding degree of robustness. It is also possible to compute the corresponding object y :

Theorem 3. *There exists an algorithm that:*

- *given a geometric property P of type $\mathcal{P}$, a geometric property Q of type $\mathcal{Q}$, computable boxes B and Y , a computable tuple δ , a computable object $x \in B$ that satisfies the property $P^\delta(x)$, and a computable number $\eta > 0$,*
- *returns a computable object $y' \in Y$ which satisfies the property $Q^\varepsilon(x, y)$, where $\varepsilon = \varepsilon_{P,Q,B,Y}(\delta') + \eta$ for some tuple δ' which is η -close to δ .*

4. Proofs

Proof of Proposition 1.

1°. Let us first analyze the property $P^\delta(x)$.

By definition, the property $P^\delta(x)$ is satisfied if all the properties $P_i^\delta(x)$ are satisfied. Each of the properties $P_i^\delta(x)$ is an inequality of the type $f(x) \leq g(x)$ for some continuous functions $f(x)$ and $g(x)$. Thus, for each i , the set $\{x : f(x) \leq g(x)\}$ of all objects x that satisfy the property $P_i^\delta(x)$ is closed. Hence, the set of all the objects x which satisfy all m properties $P_i^\delta(x)$ is also closed.

The box B is closed and bounded. Hence, the set S^δ of all the objects $x \in B$ that satisfy the property $P^\delta(x) \equiv P_1^\delta(x) \& P_2^\delta(x) \& \dots$ is a closed subset of the box, and thus also bounded and close – therefore, compact.

2°. Let us now analyze the desired property $Q^\varepsilon(x)$. This property is a logical combination of the properties $Q_{ij}^\varepsilon(x)$.

For each $x \in S$, the property $Q_{ij}^\varepsilon(x)$ is equivalent to $q_{ij}(x) \leq \varepsilon$, where:

- for basic properties $Q_{ij}(x)$ of the type $f_{ij}(x) = g_{ij}(x)$, we have $q_{ij}(x) \stackrel{\text{def}}{=} |f_{ij}(x) - g_{ij}(x)|$; and
- for basic properties $Q_{ij}(x)$ of the type $f_{ij}(x) \leq g_{ij}(x)$ or $f_{ij}(x) < g_{ij}(x)$, we have $q_{ij}(x) \stackrel{\text{def}}{=} f_{ij}(x) - g_{ij}(x)$.

It is known that the condition $(a(x) \leq \varepsilon) \& (b(x) \leq \varepsilon)$ is equivalent to a single inequality $\max(a(x), b(x)) \leq \varepsilon$. Thus, each property

$$Q_i^\varepsilon(x) \equiv Q_{i1}^\varepsilon(x) \& Q_{i2}^\varepsilon(x) \& \dots \equiv (q_{i1}(x) \leq \varepsilon) \& (q_{i2}(x) \leq \varepsilon) \& \dots$$

is equivalent to $q_i(x) \leq \varepsilon$, where $q_i(x) \stackrel{\text{def}}{=} \max(q_{i1}(x), q_{i2}(x), \dots)$.

Similarly, the logical combination $(a(x) \leq \varepsilon) \vee (b(x) \leq \varepsilon)$ is equivalent to a single inequality $\min(a(x), b(x)) \leq \varepsilon$. Thus, the property

$$Q^\varepsilon(x) \equiv Q_1^\varepsilon(x) \vee Q_2^\varepsilon(x) \vee \dots \equiv (q_1(x) \leq \varepsilon) \vee (q_2(x) \leq \varepsilon) \vee \dots$$

is equivalent to $q(x) \leq \varepsilon$, where $q(x) \stackrel{\text{def}}{=} \min(q_1(x), q_2(x), \dots)$.

3°. From Parts 1 and 2 of this proof, we conclude that the implication $\forall x \in B (P^\delta(x) \Rightarrow Q^\varepsilon(x))$ is equivalent to requiring that $q(x) \leq \varepsilon$ for all $x \in S^\delta$, i.e., equivalent to requiring that ε is larger than or equal to the maximum of the function $q(x)$ on the compact set S^δ .

The function $q(x)$ is obtained by applying continuous functions $\max$ and $\min$ to continuous functions $q_{ij}(x)$ and is, therefore, continuous itself. Every continuous function is bounded on a compact set S^δ , and thus has a finite maximum. This maximum is the smallest ε for which the above implication holds. The proposition is proven.

Proof of Proposition 2. We want to prove that $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta) \rightarrow 0$ as $\delta \rightarrow 0$, i.e., that for every $\alpha > 0$, there exists a $\beta > 0$ such that if $\delta_i \leq \beta$ for all i , then

$\varepsilon_{P,Q,B}(\delta) \leq \alpha$. Let us prove this result by contradiction. Let us assume that this property is not true, i.e., that there exists an $\alpha > 0$ for which, for every $\beta > 0$ – in particular, for $\beta = 1/n$ for every natural number $n > 0$ – there exists a $\delta(n)$ for which $\delta(n)_i \leq 1/n$ for all i and $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta(n)) > \alpha$.

According to Proposition 1, $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta(n))$ is the maximum of the function $q(x)$ on the set $S^{\delta(n)} = \{x \in B : P^{\delta(n)}(x)\}$. For each n , this maximum is attained at some point $x(n)$, so we have $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta(n)) = q(x(n))$ and thus, $q(x(n)) > \alpha$.

Since the box B is compact, from the sequence $x(n)$, we can select a convergent subsequence. Without losing generality, we can assume that $x(n)$ is this convergent subsequence, i.e., that $x(n) \rightarrow \ell$ for some point $\ell \in B$.

From the condition $q(x(n)) > \alpha$, in the limit, we get $q(\ell) \geq \alpha > 0$.

For each n , the point $x(n)$ satisfies the property $P^{\delta(n)}(x)$. For i for which $P_i(x)$ has the form $f_i(x) = g_i(x)$, this means that $|f_i(x(n)) - g_i(x(n))| \leq \delta_i(n) \leq 1/n$. In the limit $n \rightarrow \infty$, we get $|f_i(\ell) - g_i(\ell)| \leq 0$, hence $f_i(\ell) = g_i(\ell)$. Thus, the point ℓ satisfies the property P_i . Similarly, we can prove that the point ℓ satisfies all m properties $P_i(x)$. Therefore, the point $\ell \in B$ satisfies the property P .

Since we assumed that for elements of B , the property $P(x)$ implies $Q(x)$, we thus conclude that the property $Q(\ell)$ holds as well. One can check, however, that the property $Q(x) \equiv Q_1(x) \vee Q_2(x) \vee \dots$, with $Q_i(x) \equiv Q_{i1}(x) \& Q_{i2}(x) \vee \dots$ implies that

$$q(x) = \max(q_1(x), q_2(x), \dots) = \max(\min(q_{11}(x), q_{12}(x), \dots), \min(q_{21}(x), q_{22}(x), \dots), \dots) \leq 0,$$

which contradicts to our conclusion that $q(\ell) > 0$.

The contradiction proves that $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta) \rightarrow 0$ when $\delta \rightarrow 0$. The proposition is proven.

Proof of Theorem 1. For each tuple $\delta = (\delta_1, \delta_2, \dots)$ and for each real number $\eta' > 0$, we will consider the tuple $\delta' = (\delta'_1, \delta'_2, \dots)$ in which $\delta'_i = \delta_i + s_i \cdot \eta'$, where:

- for the indices i for which the property $P_i(x)$ has the form $f_i(x) = g_i(x)$ or $f_i(x) \leq g_i(x)$, we take $s_i = 1$, and
- for the indices i for which the property $P_i(x)$ has the form $f_i(x) \neq g_i(x)$ or $f_i(x) < g_i(x)$, we take $s_i = -1$.

For each real number $\eta'' > 0$, we will also consider $\delta'' \stackrel{\text{def}}{=} \delta_i - s_i \cdot \eta''$.

In the proof of Proposition 1, we showed that the property $Q^\varepsilon(x)$ is equivalent to a single inequality $q(x) \leq \varepsilon$ for an appropriate computable function $q(x)$. Let us describe a similar equivalence for the property $P^{\delta'}(x)$:

- For properties $P_i(x)$ of the type $f_i(x) = g_i(x)$, the corresponding property $P_i^{\delta'}(x)$ has the form $|f_i(x) - g_i(x)| \leq \delta_i + \eta'$, i.e., equivalently, $p_i(x) \leq \eta'$, where $p_i(x) \stackrel{\text{def}}{=} |f_i(x) - g_i(x)| - \delta_i$.
- For properties $P_i(x)$ of the type $f_i(x) \neq g_i(x)$, the corresponding property $P_i^{\delta'}(x)$ has the form $|f_i(x) - g_i(x)| \geq \delta_i - \eta'$, i.e., equivalently, $p_i(x) \leq \eta'$, where $p_i(x) \stackrel{\text{def}}{=} \delta_i - |f_i(x) - g_i(x)|$.

- For properties $P_i(x)$ of the type $f_i(x) \leq g_i(x)$, the corresponding property $P_i^{\delta'}(x)$ has the form $f_i(x) \leq g_i(x) + \delta_i + \eta'$, i.e., equivalently, $p_i(x) \leq \eta'$, where $p_i(x) \stackrel{\text{def}}{=} f_i(x) - g_i(x) - \delta_i$.
- For properties $P_i(x)$ of the type $f_i(x) < g_i(x)$, the corresponding property $P_i^{\delta'}(x)$ has the form $f_i(x) \leq g_i(x) - (\delta_i - \eta')$, i.e., equivalently, $p_i(x) \leq \eta'$, where $p_i(x) \stackrel{\text{def}}{=} f_i(x) - g_i(x) + \delta_i$.

In all four cases, each property $P_i^{\delta'}(x)$ is equivalent to $p_i(x) \leq \eta'$. Thus, the property $P^{\delta'}(x) \equiv P_1^{\delta'}(x) \& P_2^{\delta'}(x) \& \dots$ is equivalent to

$$(p_1(x) \leq \eta') \& (p_2(x) \leq \eta') \& \dots,$$

i.e., to $p(x) \leq \eta'$, where $p(x) \stackrel{\text{def}}{=} \max(p_1(x), p_2(x), \dots)$ is a computable function.

Similarly, the property $P^{\delta}(x)$ is equivalent to $p(x) \leq 0$, and the property $P^{\delta''}(x)$ is equivalent to $p(x) \leq -\eta''$.

The value $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta)$ is the maximum of the computable function $q(x)$ on the set $S^{\delta} = \{x \in B : P^{\delta}(x)\}$, i.e., on the set $S^{\delta} = \{x \in B : p(x) \leq 0\}$. Similarly, the value $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta')$ is the maximum of the computable function $q(x)$ on the set

$$S^{\delta'} = \{x \in B : p(x) \leq \eta'\},$$

and the value $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta'')$ is the maximum of the computable function $q(x)$ on the set $S^{\delta''} = \{x \in B : p(x) \leq -\eta''\}$.

Here, $q(x) \leq -\eta'' \Rightarrow q(x) \leq 0 \Rightarrow q(x) \leq \eta'$. Thus,

$$\{x \in B : p(x) \leq -\eta''\} \subseteq \{x \in B : p(x) \leq 0\} \subseteq \{x \in B : p(x) \leq \eta'\}.$$

The largest the set, the larger the maximum of the given function over this set; therefore, $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta'') \leq \varepsilon_{P,Q,B}(\delta) \leq \varepsilon_{P,Q,B}(\delta')$.

It is known (see Appendix) that for every computable function $f(x)$ on a computable compact set K (in particular, on the box B) and for every two computable values $\underline{\alpha} < \bar{\alpha}$, it is algorithmically possible to find $\alpha \in (\underline{\alpha}, \bar{\alpha})$ for which the set $\{x \in K : f(x) \leq \alpha\}$ is also a computable compact set. Thus, if we take $\underline{\alpha} = 0$ and $\bar{\alpha} = \eta$, we can find $\eta' \in (0, \eta)$ for which the set $\{x \in B : p(x) \leq \eta'\}$ is a computable compact. This is exactly the desired set $S^{\delta'}$.

Since $\eta' < \eta$, the corresponding tuples δ' and δ are indeed η -close.

It is also known that it is possible to algorithmically compute the maximum of a computable function on a computable compact set. Thus, we can algorithmically compute the corresponding value $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta')$.

Similarly, by taking $\underline{\alpha} = -\eta$ and $\bar{\alpha} = 0$, we can find a value $\alpha \in (-\eta, 0)$ for which the set $\{x \in B : p(x) \leq \alpha\}$ is a computable compact. If we take $\eta'' \stackrel{\text{def}}{=} -\alpha$, then the set $\{x \in B : p(x) \leq \alpha\} = \{x \in B : p(x) \leq -\eta''\}$ becomes exactly the desired set $S^{\delta''}$.

Since $\alpha > -\eta$, we have $\eta'' < \eta$ and thus, the corresponding tuples δ'' and δ are indeed η -close.

By computing the maximum of the computable function $q(x)$ on the computable compact set $S^{\delta''}$, we thus algorithmically compute the corresponding value $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta'')$. The theorem is proven.

Proof of Proposition 3 is based on the known fact that it is not possible to algorithmically check whether a given computable real number a is equal to 0 or not. Let us take $B = [-1, 1]$, let $P(x)$ be an equality $\max(x, 0) = 1$, and let $Q(x)$ be an equality $x = 1$. The condition $P(x)$ is only satisfied when $x = 1$, so clearly here $\forall x \in B (P(x) \Rightarrow Q(x))$.

In this case, the value $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta)$ is the maximum of the function $|x - 1|$ on the set $S^\delta = \{x \in [-1, 1] : |\max(x, 0) - 1| \leq \delta_1\}$.

Let us take $\delta_1 = 1 - |a|$. If $a = 0$, then $\delta_1 = 1$, so $S^\delta = [-1, 1]$, and the maximum $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta)$ is equal to 2 (it is attained when $x = -1$).

On the other hand, if $a \neq 0$, then $\delta_1 < 1$, so the corresponding condition $P^\delta(x)$ has the form $|\max(x, 0) - 1| \leq \delta < 1$. This condition is not satisfied when $x \leq 0$, because then $\max(x, 0) = 0$ and thus, $|\max(x, 0) - 1| = 1 > \delta$. Thus, for such a , we always have $x > 0$, $\max(x, 0) = x$, and therefore, $S^\delta \subseteq [0, 2]$. In this case, the largest value ε of the function $|x - 1|$ cannot exceed 1.

If we could compute the value $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta)$, then, by computing it with accuracy $1/3$, we would be able to tell whether $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta) = 2$ or $\varepsilon_{P,Q,B}(\delta) \leq 1$, and thus, we would be able to tell whether $a = 0$ or $a \neq 0$ – and this is known to be impossible. The proposition is proven.

Proof of Proposition 4. Similarly to the proof of Proposition 1, the property $Q^\varepsilon(x, y)$ is equivalent to $q(x, y) \leq \varepsilon$. Thus, the property $\exists y \in Y Q^\varepsilon(x, y)$ is equivalent to $\exists y \in Y q(x, y) \leq \varepsilon$, i.e., equivalently, to $q'(x) \leq \varepsilon$, where $q'(x) \stackrel{\text{def}}{=} \min_{y \in Y} q(x, y)$.

Since the function $q(x, y)$ is continuous, and the set Y is compact, the function $q'(x)$ is also a continuous function defined on a compact set, and thus, it has a finite maximum. This maximum is the smallest ε for which the above implication holds. The proposition is proven.

Proof of Proposition 5 is similar to the proof of Proposition 2, since the function $q'(x)$ is continuous.

Proof of Theorem 2 is similar to the proof of Theorem 1, since for a computable function $q(x, y)$ on a computable compact Y , the maximum $q'(x) = \min_{y \in Y} q(x, y)$ is also computable.

Proof of Theorem 3. By applying the algorithm from Theorem 2, we find the value $\varepsilon_{P,Q,B,Y}(\delta')$ for some η -close tuples δ' for which $S^\delta \subseteq S^{\delta'}$. Here, for every object $x \in B$ for which $P^\delta(x)$, we have $P^{\delta'}(x)$ and thus, we have $\exists y \in Y Q^{\varepsilon_{P,Q,B,Y}(\delta')}(x, y)$.

This means, in its turn, that $\min_{y \in Y} q(x, y) \leq \varepsilon_{P,Q,B,Y}(\delta')$. On a compact set, the minimum is attained, so there is some point y_0 for which $q(x, y_0) \leq \varepsilon_{P,Q,B,Y}(\delta')$.

By definition of a computable compact, for every n , we can algorithmically produce a computable 2^{-n} -net in this set. By enumerating all possible elements of these nets, we will get, in particular, points y which are arbitrarily close to y_0 .

For such points, $q(x, y)$ can be arbitrarily close to $q(x, y_0)$. Thus, by considering all such points y and computing $q(x, y)$ with sufficient accuracy, we will eventually find y for which $q(x, y) \leq \varepsilon \stackrel{\text{def}}{=} \varepsilon_{P,Q,B,Y}(\delta') + \eta$. This means, in terms, that these x and y satisfy the property $Q^\varepsilon(x, y)$. The theorem is proven.

REFERENCES

1. Barber C.B. Computational Geometry with Imprecise Data and Arithmetic. Ph.D. thesis, Department of Computer Science, Princeton University, Princeton, New Jersey, October 1992; available as Technical Report CS-TR-377-92.
2. Kreinovich V., Lakeyev A., Rohn J., Kahl P. Computational Complexity and Feasibility of Data Processing and Interval Computations. Dordrecht: Kluwer, 1997.
3. Mehlhorn K., Yap C. Robust Geometric Computation (to appear). URL: <http://cs.nyu.edu/yap/book/egc/>
4. Ratschek H., Rokne J. Geometric Computations with Interval and New Robust Methods, With Applications in Computer Graphics, GIS and Computational Geometry. Chichester, UK: Horwood Publ., 2003.
5. Shewchuk J.R. Adaptive precision floating-point arithmetic and fast robust geometric predicates // Discrete and Computational Geometry. 1997. V. 18. P. 305–363.
6. Shewchuk J.R. Lecture Notes on Geometric Robustness. URL: <http://www.cs.berkeley.edu/~jrs/meshpapers/robnotes.pdf>
7. Schirra S. Robustness and precision issues in geometric computation // Sack J., Urrutia J. (editors). Handbook of Computational Geometry. Amsterdam: Elsevier, 1999.
8. Vavasis S.A. Nonlinear Optimization: Complexity Issues. New York: Oxford University Press, 1991.
9. Weihrauch K. Computable Analysis. Berlin: Springer-Verlag, 2000.

A Computable Functions: Brief Reminder

For details, see, e.g., [2, 9].

- A real number x is called *computable* if there exists an algorithm that, given a natural number k , returns a rational number r_k for which $|r_k - x| \leq 2^{-k}$.
- A tuple is called *computable* if all its elements are computable.
- A function $f(x_1, \dots, x_n)$ from real numbers to real numbers is called *computable* if there exist two algorithms:
 - an algorithm that, given rational numbers $r_1, \dots, r_n$, and an integer k , returns a rational number r for which $|r - f(r_1, \dots, r_n)| \leq 2^{-k}$; and
 - an algorithm that, given a rational number $\varepsilon > 0$, returns a rational number $\delta > 0$ such that if $|x_i - x'_i| \leq \delta$ for all i , then

$$|f(x_1, \dots, x_n) - f(x'_1, \dots, x'_n)| \leq \varepsilon.$$

- A compact set K is called *computable* if there exists an algorithm that, given a natural number n , generates a finite 2^{-n} -net for this set, i.e., a finite set such that every element $x \in K$ is 2^{-n} -close to one of the points on this list.
- There exists an algorithm that, given a computable function $f(x_1, \dots, x_n)$ on a computable compact set K , returns the maximum and the minimum of the function $f(x)$ over this set.
- There exists an algorithm that, given a computable function $f(x, y)$ on a computable compact set $X \times Y$, returns the computable functions $\max_{y \in Y} f(x, y)$ and $\min_{y \in Y} f(x, y)$.
- For every computable compact set K , for every computable function $f(x)$, and for every two computable numbers $\underline{\alpha} < \bar{\alpha}$, we can algorithmically find a value $\alpha \in (\underline{\alpha}, \bar{\alpha})$ for which the set $\{x \in K : f(x) \leq \alpha\}$ is a computable compact set.

КАК СДЕЛАТЬ ЭЛЕМЕНТАРНУЮ ГЕОМЕТРИЮ БОЛЕЕ УСТОЙЧИВОЙ И ТЕМ САМЫМ БОЛЕЕ ПРАКТИЧНОЙ: ОБЩИЕ АЛГОРИТМЫ

О. Кошелева

к.ф.-м.н., доцент, e-mail: olgak@utep.edu

Техасский университет в Эль Пасо, США

Аннотация. Многие результаты элементарной геометрии предполагают *точное равенство* между некоторыми углами или расстояниями. Однако, на практике, равенство бывает только приближённое. В таких ситуациях традиционные результаты не позволяют нам делать какие-либо выводы. Таким образом, чтобы сделать элементарную геометрию более практической, нужно сделать её более устойчивой, т.е. применимой также и к ситуациям, когда у нас есть только приближённое равенство. Необходимость такой устойчивой версии геометрических результатов очевидна, и существует много таких версий. В этой работе мы приводим общие алгоритмы для получения таких устойчивых результатов.

Ключевые слова: элементарная геометрия, устойчивая геометрия, практические приложения геометрии, геометрические алгоритмы.

HOW TO GAUGE UNKNOWN UNKNOWN: A POSSIBLE THEORETICAL EXPLANATION OF THE USUAL SAFETY FACTOR OF 2

J. Lorkowski

Ph.D. Student, e-mail: lorkowski@computer.org

V. Kreinovich

Ph.D. (Math.), Professor, e-mail: vladik@utep.edu

University of Texas at El Paso, El Paso, TX 79968, USA

Abstract. To gauge the accuracy of a measuring instrument, engineers analyze possible factors contributing to the instrument's inaccuracy. In addition to *known* factors, however, there are usually *unknown* factors which also contribute to the instrument's inaccuracy. To properly gauge the instrument's accuracy — and thus, to make sure that we do not compromise our safety by underestimating the inaccuracy — we need to also take these “unknown unknowns” into account. In practice, this is usually done by multiplying the original estimate for inaccuracy by a “safety” factor of 2. In this paper, we provide a possible theoretical explanation for this empirical factor.

Keywords: safety factor, measurement accuracy, Laplace principle of indifference.

1. Safety Factor: Description of the Problem

What is a safety factor? When engineers design an accurate measuring instrument, they try their best to make it as accurate as possible. For this purpose, they apply known techniques to eliminate (or at least to drastically decrease) all major sources of error. For example:

- thermal noise can be drastically decreased by cooling,
- the effect of the outside electromagnetic fields can be drastically decreased by barriers made of conductive or magnetic materials,
- the effect of vibration can be decreased by an appropriate suspension, etc.

Once the largest sources of inaccuracy are (largely) eliminated, we need to deal with the next largest sources, etc. No matter how many sources of inaccuracy we deal with, there is always the next one. As a result, we can never fully eliminate all possible sources of inaccuracy.

At each stage of the instrument design, we usually understand reasonably well what is the main source of the remaining inaccuracy, and how to gauge the corresponding inaccuracy. As a result, we have a good estimate for the largest possible value Δ of the inaccuracy caused by this source.

This value Δ , however, does not provide a full description of the measurement inaccuracy. Indeed, in addition to the “known unknown” (the known main source of remaining inaccuracy), there are also “unknown unknowns” — smaller additional factors that also contribute to measurement inaccuracy.

To take these “unknown unknowns” into account, practitioners usually multiply Δ by a larger-than-one factor. This factor is known as the *safety factor*.

A related idea is used when we design engineering objects such as roads, bridges, houses, etc. For example, when we design a bridge, we want to make sure that its deformation caused by different loads does not exceed the limit after which catastrophic changes may occur. For this purpose, we first estimate the deformation caused by the known factors, and then — to be on the safe side — multiply this deformation by a safety factor.

Safety factor of 2 is most frequently used. In civil engineering, a usual recommendation is to use the safety factor of 2; see, e.g., [6].

This value has been in use for more than 150 years: according to [5], the earliest recorded use of this value can be traced to a book published in 1858 [3].

This value is also widely used beyond standard civil engineering projects: e.g., it was used in the design of Buran, a successful Soviet-made fully automatic pilotless Space Shuttle [2].

Comment. It should be mentioned that in situations requiring extreme caution — e.g., in piloted space flights — usually, a larger value of safety factor is used, to provide additional safety.

Open problem. The fact that the safety factor of 2 has been in use for more than 150 years shows that this value is reasonable. However, there seems to be no convincing explanation of why this particular value is empirically reasonable.

In this paper, we provide a possible theoretical explanation for this value.

2. Safety Factor of 2: Our Explanation

Analysis of the problem. We know that in addition to the largest inaccuracy of size Δ , there is also next largest inaccuracy of size $\Delta_1 < \Delta$. Once we take that inaccuracy into account, then we will need to take into account the next inaccuracy, of size $\Delta_2 < \Delta_1$, etc. The final inaccuracy can be estimated as the sum of all these inaccuracies, i.e., as the sum $\Delta + \Delta_1 + \Delta_2 + \dots$, where

$$\dots < \Delta_{k+1} < \Delta_k < \dots < \Delta_2 < \Delta_1 < \Delta.$$

To estimate this sum, it is therefore necessary to estimate all the sizes $\Delta_1, \Delta_2, \dots$

Let us estimate these sizes one by one.

Estimating Δ_1 . The only information that we have about the value Δ_1 is that it is larger than 0 and smaller than Δ . In other words, in principle, Δ_1 can take any value from the interval $(0, \Delta)$. We have no information about the probabilities of different values from this interval.

Since we have no reason to think that some specific value from this interval is more probable and some other specific value is less probable, it is reasonable to assume that all the values from this interval are equally probable. This argument — known as *Laplace principle of indifference* — is widely used in statistics applications; see, e.g., [1, 4]

In precise terms, this means that we assume that the distribution of possible values Δ_1 on the interval $(0, \Delta)$ is *uniform*. For the uniform distribution on an interval, the expected value is the interval's midpoint. Thus, the expected value of Δ_1 is equal to $\Delta/2$.

This expected value is what we will use as an estimate for Δ_1 .

Estimating Δ_2 , etc. Once we produced an estimate $\Delta_1 = \Delta/2$, a next step is to estimate the next inaccuracy component Δ_2 . The only information that we have about the value Δ_2 is that it is larger than 0 and smaller than Δ_1 . In other words, in principle, Δ_2 can take any value from the interval $(0, \Delta_1)$. We have no information about the probability of different values from this interval. Thus, similarly to the previous section, it is reasonable to assume that Δ_2 is uniformly distributed on the interval $(0, \Delta_1)$. In this case, the expected value of Δ_2 is equal to $\Delta_1/2$. This expected value $\Delta_2 = \Delta_1/2$ is what we will use as an estimate for Δ_2 .

Similarly, we conclude that a reasonable estimate for $\Delta_3 < \Delta_2$ is $\Delta_3 = \Delta_2/2$, and, in general, that for every k , a reasonable estimate for $\Delta_{k+1} < \Delta_k$ is $\Delta_{k+1} = \Delta_k/2$.

Adding up all these estimates lead to the desired explanation. From $\Delta_1 = \Delta/2$ and $\Delta_{k+1} = \Delta_k/2$, we can conclude, by induction, that $\Delta_k = 2^{-k} \cdot \Delta$. Substituting these estimates into the formula for the overall inaccuracy $\delta = \Delta + \Delta_1 + \Delta_2 + \dots$, we conclude that

$$\delta = \Delta + 2^{-1} \cdot \Delta + 2^{-2} \cdot \Delta + \dots = (1 + 2^{-1} + 2^{-2} + \dots) \cdot \Delta.$$

The sum of the geometric progression $1 + 2^{-1} + 2^{-2} + \dots$ is 2, so we get $\delta = 2\Delta$.

This is exactly the formula that we tried to explain — with a safety factor of two.

Acknowledgments

This work was supported in part by the National Science Foundation grants HRD-0734825 and HRD-1242122 (Cyber-ShARE Center of Excellence) and DUE-0926721.

REFERENCES

1. Jaynes E.T. Probability Theory: The Logic of Science. Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, 2003.

2. Maslova N.B. Private communication.
3. Rankine W.J.M. A Manual on Applied Mechanics. Glasgow, Scotland: Richard Griffin and Company, 1858. P. 274. URL: <https://archive.org/stream/manualappmecha00rankrich#page/n8/mode/1up>
4. Sheskin D.J. Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures. Chapman and Hall/CRC Press, Boca Raton, Florida, 2011.
5. Smith R.A., Hillmans S. A brief historical overview of the fatigue of railway axles // Proceeding of the Institute of Mechanical Engineering. 2004. V. 218. P. 267–277.
6. Ullman D. Mechanical Design Process. New York: McGraw-Hill, 2009. P. 314–317.

КАК ОЦЕНИТЬ «НЕИЗВЕСТНЫЕ НЕИЗВЕСТНЫЕ»: ВОЗМОЖНОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА «НАДЁЖНОСТИ» 2

Дж. Лорковский

аспирант, e-mail: lorkowski@computer.org

В. Крейнович

к.ф.-м.н., профессор, e-mail: vladik@utep.edu

Техасский университет в Эль Пасо, США

Аннотация. Чтобы оценить точность измерительного прибора, инженеры анализируют возможные факторы, способные вызвать погрешность. Однако, в добавок к известным факторам, обычно существуют неизвестные факторы, которые также способны вызвать погрешность. Чтобы правильно оценить точность прибора и тем самым убедиться, что мы не рискуем надёжностью, недооценивая погрешность, мы должны также принимать во внимание эти «неизвестные неизвестные». На практике для этого изначальную оценку погрешности обычно умножают на коэффициент «надёжности» 2. В данной статье мы представляем возможное теоретическое объяснение для этого эмпирического коэффициента.

Ключевые слова: коэффициент надёжности, точность измерения, принцип безразличия Лапласа.

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ СИМПТОМОКОМПЛЕКСОВ

В.В. Гольяпин

старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., доцент, e-mail: goltyapin@mail.ru

Омский филиал Учреждения Российской академии наук Института математики
им. С.Л. Соболева Сибирского отделения РАН, г. Омск

Аннотация. Разработан метод и построен вычислительный алгоритм, позволяющие формировать диагностические симптокомплексы с помощью вероятностного метода распознавания. В рамках теории латентного анализа сформулированы утверждение, лемма и теорема, позволяющие находить апостериорные вероятности на базе альтернативных показателей с использованием ортогональной факторной структуры.

Ключевые слова: симптомокомплекс, факторная модель, латентная модель, корреляционный анализ, маргинальное распределение, маргинал.

1. Введение

Известно, что многомерный факторный анализ применяется преимущественно для обработки количественных показателей. В основе любого факторного исследования лежит корреляционная матрица, полученная на базе исходных количественных показателей, имеющих нормальное распределение или хотя бы близкое к нему [1, 2]. Но, к сожалению, не всегда переменные могут быть измерены количественно. Особо часто встречаются переменные, которые обладают альтернативной вариацией. Нижеследующий математический аппарат позволяет использовать модели факторного анализа для обработки альтернативных данных и формировать зависимые и независимые симптомокомплексы с помощью латентного анализа.

2. Постановка задачи

Обозначим количество объектов исследования как n — объем выборки, а количество измеряемых параметров как m — размерность выборки. Тогда исходные альтернативные данные для факторного исследования представляются в виде таблицы, столбцы которой — объекты исследования, а строки — значения измеряемых параметров у конкретного объекта. Далее полученная таблица записывается в виде матрицы Y размерности $m \times n$. Элемент этой матрицы обозначим как y_{ij} , где индекс $i=1, \dots, m$ относится к параметрам, а индекс $j=1, \dots, n$ — к объектам, α_i — число единиц в i -ой строке матрицы Y .

Каждый столбец этой матрицы можно рассматривать в виде вектора-объекта исследования и обозначать $\vec{y}_j = (y_{1j}, \dots, y_{mj})$. Стандартное отклонение и выборочное математическое ожидание i -го показателя обозначим соответственно

$$\text{как } s_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\alpha_i - \frac{\alpha_i^2}{n} \right)} \text{ и } \bar{y}_i = \frac{\alpha_i}{n}.$$

Для альтернативных данных модель факторного анализа предлагается в следующем виде:

$$Z = AF, \quad (1)$$

где Z — матрица стандартизованных данных, полученных по формуле

$$z_{ij} = \frac{y_{ij} - \bar{y}_i}{s_i} = \frac{y_{ij} - \frac{\alpha_i}{n}}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\alpha_i - \frac{\alpha_i^2}{n} \right)}} \quad (2)$$

размерности $m \times n$, A — матрица факторного отображения размерности $m \times r$, F — матрица факторных значений размерности $r \times n$, r — количество выделяемых факторов. Ниже следующая теорема позволяет нам строить факторные модели на альтернативных показателях.

Теорема 1. Фундаментальная теорема Терстоуна справедлива для альтернативных данных [1].

Полагая отсутствие корреляционной зависимости между факторами, матрицу весовых нагрузок факторов A можно находить различными ортогональными методами факторного анализа (метод главных факторов с варимакс вращением, метод минимальных остатков, метод максимума правдоподобия и т.д.) [1, 2].

Для определения количества выделяемых факторов предлагается выбрать одну или несколько процедур: определение, основанное на предварительной информации; определение, основанное на собственных значениях факторов (критерий «каменистой осыпи»); определение на основе процента объяснённой дисперсии; метод расщепления и критерии значимости.

3. Вероятностный метод формирования диагностических симптомокомплексов

Суть латентного анализа состоит в обработке теста или анкеты, состоящей из r вопросов, которые относятся к изучаемой скрытой характеристике. Выделенные вопросы называют явными переменными, а скрытую характеристику — латентной переменной. В теории тестов скрытая характеристика интерпретируется как одномерный латентный континуум (непрерывная латентная переменная) [4, 5]. Переходя непосредственно к построению латентной модели на базе альтернативных данных, введём следующие обозначения: p_i — отношение числа лиц, положительно ответивших на i -ый вопрос к общему числу респондентов; p_{ij} — отношение числа лиц, положительно ответивших на i -ый

и j -ый вопросы к общему числу респондентов; $p_{i\bar{j}}$ — отношение числа лиц, положительно ответивших на i -ый и отрицательно на j -ый вопросы, к общему числу респондентов; $p_{\bar{i}j}$ — отношение числа лиц, отрицательно ответивших на i -ый и j -ый вопросы к общему числу респондентов; p_{ijk} — отношение числа лиц, положительно ответивших на i -ый, j -ый и k -ый вопросы, к общему числу респондентов; $p_{i\bar{j}k}$ — отношение числа лиц, положительно ответивших на i -ый и k -ый вопросы и отрицательно на j -ый, к общему числу респондентов; $p_{\bar{i}jk}$ — отношение числа лиц, отрицательно ответивших на i -ый и j -ый вопросы при положительном ответе на k -ый вопрос, к общему числу респондентов; $\tilde{\varphi}(x_i)$ — частота, соответствующая относительному объему i -го класса; $\tilde{f}_j(x_i)$ — вероятность положительного ответа респондента на j -ый вопрос, находясь в i -ом классе; $\tilde{f}_{jk}(x_i)$ — вероятность положительного ответа респондента на j -ый и k -ый вопросы, находясь в i -ом классе; $\tilde{f}_{123}(x_i)$ — вероятность положительного ответа респондента на первый, второй и третий вопросы, находясь в i -ом классе.

Используя эти данные при построении латентной модели на базе альтернативных при наличии трех вопросов и двух латентных классов, получаем дискретные классы респондентов и разрешимую систему уравнений с дискретными переменными:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\phi}(x_1) + \tilde{\phi}(x_2) = 1 \\ p_1 = \tilde{f}_1(x_1)\tilde{\phi}(x_1) + \tilde{f}_1(x_2)\tilde{\phi}(x_2) \\ p_2 = \tilde{f}_2(x_1)\tilde{\phi}(x_1) + \tilde{f}_2(x_2)\tilde{\phi}(x_2) \\ p_3 = \tilde{f}_3(x_1)\tilde{\phi}(x_1) + \tilde{f}_3(x_2)\tilde{\phi}(x_2) \\ p_{12} = \tilde{f}_{12}(x_1)\tilde{\phi}(x_1) + \tilde{f}_{12}(x_2)\tilde{\phi}(x_2) \\ p_{13} = \tilde{f}_{13}(x_1)\tilde{\phi}(x_1) + \tilde{f}_{13}(x_2)\tilde{\phi}(x_2) \\ p_{23} = \tilde{f}_{23}(x_1)\tilde{\phi}(x_1) + \tilde{f}_{23}(x_2)\tilde{\phi}(x_2) \\ p_{123} = \tilde{f}_{123}(x_1)\tilde{\phi}(x_1) + \tilde{f}_{123}(x_2)\tilde{\phi}(x_2). \end{array} \right. \quad (3)$$

Для решения системы уравнения (3) предлагается воспользоваться результатами и формулами из ниже следующего утверждения, леммы и теоремы.

Утверждение. При известности вероятностей латентной модели с двумя классами и тремя вопросами нахождение частоты $\tilde{\varphi}(x_i)$ сводится к каноническому уравнению прямой с точкой (p_1, p_2, p_3) и направляющим вектором

$$\vec{n} = (f_1(x_i) - f_1(x_j), f_2(x_i) - f_2(x_j), f_3(x_i) - f_3(x_j)),$$

где $i \neq j$.

Лемма. Отношение условного произведения трёх вопросов к произведению двух вопросов в латентной модели равно произведению вероятностей положительного ответа респондента на условный вопрос.

Теорема 2. Наличие всех маргиналов для латентной модели с двумя классами и тремя вопросами позволяет свести поиск всех неизвестных вероятностей к решению трёх квадратных уравнений.

Далее предполагается совместное использование латентной модели и ортогональной факторной структуры для построения алгоритма метода. Первая задача метода — сформировать набор симптомокомплексов, опираясь на ортогональную факторную структуру с учётом уровня значимости φ коэффициента по χ^2 критерию. Вторая задача метода — для каждого симптомокомплекса найти диагностическую шкалу на базе простейшей латентно-структурной модели.

Для упрощения в целях дальнейшего изложения введём функцию

$$\gamma_{lk}(y_{i,j}) = \begin{cases} \tilde{f}_{ik}(x_l), & \text{если } y_{ij} = 1 \\ 1 - \tilde{f}_{ik}(x_l), & \text{если } y_{ij} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где l — номер класса и может принимать значение 1 или 2, k — номер симптомокомплекса, $\tilde{f}_{ik}(x_l)$ — вероятность положительного ответа респондента из l -ого класса на i -ый вопрос, выбранный как параметр, составляющий симптомокомплекс. Условием вхождения параметров в зависимый или независимый симтокомплекс является значение весовых нагрузок соответствующего фактора на уровне не ниже 0,5.

Вероятность принадлежности первому классу вычисляется посредством формулы Байеса с использованием введённой функции

$$p(1|y_{a_{kj}}, y_{b_{kj}}, y_{c_{kj}}) = \frac{\gamma_{1k}(y_{a_{kj}})\gamma_{1k}(y_{b_{kj}})\gamma_{1k}(y_{c_{kj}})}{\sum_{i=1}^2 \gamma_{ik}(y_{a_{kj}})\gamma_{ik}(y_{b_{kj}})\gamma_{ik}(y_{c_{kj}})}, \quad (5)$$

где a_k, b_k, c_k — номера трёх параметров k -го симптомокомплекса.

Алгоритм метода:

1. Из матрицы Y путём элементарного преобразования получаем матрицу Z размерности $m \times n$.
2. Вычисляем корреляционную матрицу R .
3. С целью исключения незначимых показателей вычисляем вероятностные значения уровней зависимости по формуле $\chi^2 = n \cdot \varphi$ при единичной степени свободы.
4. Определяем наименьшее количество выделяемых факторов (критерий Гуттмана, критерий «каменной осыпи» или другой адекватный критерий) [1].
5. Находим общности любым из известных методов (лучше взять метод минимальных остатков) [1, 2, 6].
6. Вычисляем первичную ортогональную матрицу весовых нагрузок факторов A размерности $m \times r$ (метод главных факторов, метод минимальных остатков или любой другой адекватный метод) [1, 2, 6].
7. Полученную на предыдущем шаге матрицу весовых нагрузок подвергаем ортогональному вращению в соответствии с варимакс критерием [2, 6].

8. Осуществляем анализ ортогональной факторной структуры, полученной после вращения, и формируем зависимые и независимые симптомокомплексы.
9. Для каждого симптомокомплекса формируем диагностическую шкалу, вычисляя маргиналы и решая систему уравнений (3), используя результаты теоремы 2.
10. По формуле (4) вычисляем частные апостериорные вероятности для всех объектов исследования.

4. Заключение

Дано математическое обоснование возможности применения альтернативных данных в факторном исследовании. Для латентно-структурной модели сформулированы и доказаны: Утверждение, позволяющее находить относительный объем соответствующего класса через каноническое уравнение прямой; Лемма о соотношении условного произведения трёх вопросов к произведению двух вопросов; Теорема о сведении решения системы уравнений латентно-структурной модели к решению трёх квадратных уравнений.

На базе полученных теоретических выкладок построен вычислительный алгоритм, позволяющий строить диагностические симптокомплексы на базе альтернативных данных, оптимальной ортогональной факторной структуры, простейшей латентно-структурной модели и формулы Байеса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иберла К. Факторный анализ. М.: Статистика, 1980.
2. Харман Г. Современный факторный анализ. М.: Статистика, 1972.
3. Кендалл М.Дж., Стюарт А.Т. Статистические выводы и связи. М.: Наука 1973.
4. Осипов Г.В. Методы измерения в социологии. М.: Наука, 2003.
5. Lazarsfeld P.F. The logical and mathematical foundation of latent structure analysis // Measurement and Prediction. N.Y., 1950.
6. Гольцяпин В.В. Вычислительные аспекты метода минимальных остатков при разрешении варианта Хейвуда // Сибирский журнал индустриальной математики. 2005. Том VII, № 3(23). С. 145–151.

THE PROBABILISTIC METHOD OF THE SET OF SYMPTOMS FORMATION

V.V. Goltyapin

PhD(Math.), Associate Professor, Senior Researcher, e-mail: goltyapin@mail.ru

Omsk Branch of Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch of the Russian
Academy of Science, Omsk

Abstract. This paper presents a method for calculating the redistribution of the initial and / or ongoing resources in a wide range of practical problems of optimal control. The presented method is based on a special extension of the dynamic equations of the system that formalizes the original problem. Additional terms of the right sides of the equations describe the managed switch in currents linking the components of the system state. Within a given intensity-sharing switch allows arbitrary reallocation of module components (resources) while maintaining their current amount. The form of the function, majorizing flow rate, is determined by the type of task. In problems of the first type accommodation of the initial resources is a part of optimizable initial conditions, and the reallocation of resources to the control interval is prohibited or physically impossible. In problems of the second type initial conditions are hard coded, but it is allowed to reallocate current total resources in the control interval. In problems of the third type it is allowed to optimize the initial resource accommodation as well as the reallocation of resources in the control interval.

Keywords: accommodation, reallocation, resources, flows, switching, dynamic systems, neural networks.

МАРКОВСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ ЭВОЛЮЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

В.А. Воловоденко

к.т.н., доцент каф. ОСУ, Институт кибернетики, e-mail: cowboy@osu.cctpu.edu.ru

Н.А. Ефремова

ст. пр. каф. ОФ, Физико-технический институт, e-mail: ena@tpu.ru

В.И. Ефремов

инженер, Физико-технический институт, e-mail: efremvad@ya.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Аннотация. В статье рассматривается моделирование геофизических полей. Решение задач, связанных с изучением сверхдлиннопериодных процессов, потребовало разработки новых методов моделирования и экспериментального анализа данных. Авторы предлагают использовать спектральный метод решения систем дифференциальных уравнений, описывающих динамику изменения вероятностей состояния марковского процесса в условиях нестационарных вероятностей перехода. Утверждается, что марковские процессы являются одной из важнейших моделей для реально протекающих процессов в природе, так как аппарат их достаточно хорошо разработан. Использование спектрального метода для решения систем дифференциальных уравнений даёт следующие преимущества: 1) однородное представление для операций и процедур; 2) однородное представление одномерных сигналов; и 3) возможность параметрирования среды. Особый интерес вызывает тот ряд обстоятельств, который связан с ослаблением временных зависимостей моделей, которые в области операторных представлений сводятся к простым параметрическим связям. Таким образом, достигается не только возможность решения задач из более обширного класса, но и возможность накопления информации. Работа может представлять интерес для тех, кто занимается моделированием природных процессов.

Ключевые слова: моделирование геофизических полей, динамика изменений, Марковские процессы, нестационарности, неупорядоченные вероятности, геологическая структура, статистические методы, структурное изменение, сетка, случайные величины, дискретные переменные, метод интерполяции, стационарный случайный процесс, дискретное состояние, постоянная времени, предел преобразования.

Введение

Работа посвящена моделированию геофизических полей. На современном этапе развития наук о Земле приходится иметь дело с множеством, содержа-

щим огромное число неупорядоченных элементов. Практически описать все эти элементы, относящиеся к разным областям знаний общей науки о Земле, оказывается невозможным. Решение задач, связанных с изучением сверхдлиннопериодных процессов также потребовало разработки новых методов моделирования и анализа экспериментальных данных. Авторы данной работы предлагают использовать спектральный метод решения систем дифференциальных уравнений, описывающих динамику изменения вероятностей состояния марковского процесса в условиях нестационарных вероятностей перехода. Авторы приводят обоснование предлагаемой методики: марковские процессы являются одной из важнейших моделей для реально протекающих процессов в природе; аппарат их достаточно хорошо разработан и др. Практически все процессы моделирования, в том или ином случае, носят случайный характер. Отличительной особенностью марковских процессов является то, что в каждый конкретный момент времени дальнейший ход такого процесса обуславливается только его состоянием в этот момент и не зависит от характера течения процесса в предшествовавшие периоды. Для марковского процесса суждение (и модель) о будущем несколько не меняется в случае расширения или резкого изменения знаний относительно предшествовавшего периода. Использование спектрального метода для решения систем дифференциальных уравнений даёт следующие преимущества: 1) однородное представление для операций и процедур; 2) однородное представление одномерных сигналов; 3) возможность параметрирования среды. Особый интерес вызывает тот ряд обстоятельств, который связан с ослаблением временных зависимостей моделей, которые в области операторных представлений сводятся к простым параметрическим связям. Таким образом, достигается не только возможность решения задач из более обширного класса, но и возможность накопления информации. Спектральный метод позволяет по линейным уравнениям записать явное выражение их решения в замкнутой форме, пользуясь символикой матриц. Использование спектрального метода приводит к алгебраической форме связей между характеристиками системы. Эти связи удобно представить в матрично-операторной форме. Это позволяет получить выражение передаточных функций, выходных сигналов систем и их характеристик в явном виде, проводить преобразование выражений, описывающих исследуемую систему, в символической форме с целью их упрощения. И лишь на конечном этапе исследования для нахождения количественных характеристик выполнять вычисления на компьютере по матрично-операторным формулам с помощью стандартных подпрограмм и справочного материала.

Теория

В развитии современной геологии наметилась характерная тенденция последовательного перехода от детальных исследований статической структуры различных оболочек Земли к изучению процессов, приводящих к эволюции различных геофизических полей и характеризующихся большими временными масштабами. Развитию временного аспекта в проблематике геофизических исследований во многом способствовало создание академиком М.А. Садовским

новой модели геофизической среды, рассматривающей среду как дискретную иерархическую систему блоков и отдельностей, с энергообменом между последними, существенными проявлениями нелинейных свойств, в частности временной изменчивостью характеристик [1]. В общем случае сложные объекты различной природы можно рассматривать в этих задачах, как дискретную систему с большим числом взаимодействующих элементов. Реакция такой системы на внешнее воздействие представляется в виде совокупности нескольких фаз [1]:

- 1) накопление дополнительных напряжений в системе за счёт энергии внешнего воздействия;
- 2) высвобождение некоторой части дополнительных напряжений системы непосредственно после прекращения воздействия;
- 3) перестройка напряжений в системе без высвобождения энергии в виде колебаний, которая продолжается в течение некоторого времени, определяемого свойствами системы и её взаимодействиями;
- 4) самопроизвольные колебания, которые управляют системой таким образом, что она переходит в устойчивое энергетическое состояние с высвобождением максимально возможной запасённой энергии.

Внешнее воздействие на дискретную систему заключается, в конечном счёте, в передаче энергии воздействия её элементам и перестройке внутренних напряжений, что приводит к изменениям её внутренней структуры и энергетического состояния. Значительная часть энергии внешнего воздействия остаётся в дискретной системе в виде запасённой энергии после снятия внешнего воздействия и определяет последующие динамические процессы взаимодействия её структурных элементов с высвобождением запасённой энергии и вторичными нелинейными эффектами реакции системы на внешнее воздействие. На базе этих представлений за последние годы удалось получить целый ряд важных фундаментальных результатов по характеристикам сверхдлиннопериодных деформационных процессов. К числу таких явлений относятся изменения во времени характеристик гидрогеодинамических процессов. Для характеристик поля деформаций и других геофизических полей в земной коре установлен волновой или колебательный характер изменения с продолжительными временными циклами или масштабами, насчитывающими от нескольких лет и более. Решение задач, связанных с изучением сверхдлиннопериодных деформационных процессов потребовало разработки новых методов наблюдений и анализа экспериментальных данных.

Анализ динамических процессов, происходящих в геофизической среде под воздействием различных полей, может производиться на основе многообразных математических моделей. Если речь идёт о создании моделей геологических структур с развивающимися во времени процессами, то для описания таких процессов необходим математический аппарат адекватный этому классу процессов. Многие характеристические особенности процессов, происходящих в геологических средах, можно отнести к особенностям класса стационарных систем. Здесь под классом стационарных систем подразумеваются системы с постоянными во времени параметрами и структурой. В этом случае применяются модели прямого типа, основанные на статистических методах: регрессионный,

факторный анализ, метод группового учёта аргументов и т.д. В случае рассмотрения динамических процессов привлекаются дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами. Существует, однако, класс задач, для которого эти методы являются малопригодными. Эти задачи связаны с проявлением явной временной и структурной нестационарности. В частности оказывается, что изменение параметров геологической среды во времени может приводить к изменению её структуры, что приводит к неприменимости математического аппарата, предназначенного для описания систем с постоянными параметрами и структурой.

Типичным примером таких систем являются геологические системы, испытывающие на себе воздействие техногенных факторов и эндогенных геологических процессов. Примером первого типа процессов являются процессы, возникающие при разработках газовых и нефтяных месторождений. Специалистам хорошо известны последствия бурения скважин, приводящие к катастрофическим изменениям структуры водоносных и нефтяных пластов. Второй тип процессов можно наблюдать в рамках систем, подверженных эндогенным геологическим процессам. Это размыв береговой линии рек, процессы ветровой эрозии и другие проявления структурно-параметрической неустойчивости.

Медленное развитие таких геологических систем и явлений на фоне установившегося стационарного режима смены внешних воздействий может резко измениться при малейшем вмешательстве со стороны человека. В таком случае процесс развития легко переходит в катастрофическую стадию и, как следствие, меняет свои параметры. Уже в начальной стадии зарождения все применяемые методы описания, ориентирующиеся на стационарность, теряют адекватность процессу и становятся непригодными для описания явлений. Для сохранения адекватности модели тому процессу, который она описывает, приходится менять математическую основу представления основных звеньев модели. Смена математической основы порождает ряд вопросов, без разрешения которых дальнейшее развитие процесса моделирования становится невозможным.

Одним из таких вопросов является вопрос об уровне согласованности математического, алгоритмического и программного обеспечения процессов моделирования и представления данных. При внимательном рассмотрении задачи моделирования процесса разработки и эксплуатации нефтяного или газового месторождения оказывается, что все данные, необходимые даже на начальной стадии моделирования или проектирования, представлены в очень разнообразной форме и требуют не менее разнообразных структур для своего представления. Многообразие структур данных порождается не только природой их возникновения, но возможностями их комплексного представления, хранения и обработки. Основой для решения всего комплекса затронутых вопросов может служить правильно подобранный математический аппарат, адекватный природе описываемых геологических процессов, с одной стороны, и обеспечивающий однородную процедуру моделирования процессов и представления данных – с другой.

С нашей точки зрения таким математическим аппаратом может быть прикладной функциональный анализ. На его основе возможно построение систем

моделирования, обладающих достаточно общими или универсальными свойствами в области создания теоретических моделей, их алгоритмического и программного обеспечения. Столь широкая универсальность предложенного подхода базируется на том, что на основе методов, порождаемых в рамках функционального анализа, можно вести описание не только самого процесса моделирования, но и процессов обработки данных. При этом все описания допускают операторное представление. В свою очередь операторная форма представления структур, алгоритмов и процедур обработки данных в значительной степени повышает гибкость процесса моделирования. Более того, за счёт однородности представления звеньев моделей в виде матричных структур, а сигналов в виде векторов достигается надёжность и универсальность процедур моделирования систем, допускающих блочное описание в виде последовательно-параллельных структурных схем.

Наиболее интересными примерами реализации рассматриваемого подхода являются такие методы как спектральный метод расчёта нестационарных систем [2], интерполяционный метод [3], метод изображающих векторов [4]. Все из указанных методов легко интерпретируют процессы обработки данных в стационарном и нестационарном случаях. Более того, возможно их использование для описания операций над дискретными переменными.

В рамках спектрального и сопутствующих ему методов возможна не только строго детерминированная постановка задачи, но допускается использование случайных величин. Это обстоятельство позволяет учитывать потребности практиков, когда речь идёт об учёте случайных факторов и процессов, развивающихся на фоне строго определённых закономерностей.

Решение ряда задач для случайных процессов любого вида представляет большие трудности. Однако удаётся получить сравнительно простые методы расчёта, если отказаться от рассмотрения случайных процессов общего вида и ограничиться только процессами, обладающими некоторыми специальными свойствами, и тем не менее имеющими непосредственный практический интерес. Такими процессами и являются марковские [4]. Марковские процессы являются одной из важнейших моделей для реально протекающих процессов в природе, и аппарат их достаточно хорошо разработан.

Случайный процесс, протекающий в системе S является марковским, если он обладает следующим свойством: вероятность того, что система окажется в некотором S_j , в некоторый момент времени t_l зависит только от того, в каком состоянии находилась система в предыдущий момент времени t_{l-1} и не зависит от эволюции системы до момента времени t_{l-1} . Другими словами в марковском случайном процессе, будущее развитие его зависит только от настоящего состояния системы и не зависит от «предыстории» процесса [5].

Пусть дана физическая система S , которая может находиться в состояниях:

$$S_1, S_2, \dots, S_n,$$

причём переходы системы из состояния в состояние возможны только в моменты времени:

$$t_1, t_2, \dots, t_k.$$

Случайный процесс будет марковским, если для каждого момента времени вероятность перехода из любого состояния S_i в любое состояние S_j *не зависит от того, когда и как система пришла в состояние S_i* . Марковские процессы описываются с помощью так называемых *вероятностей состояний*. Пусть в любой момент времени (после любого k -го шага) система S может быть в одном из состояний:

$$S_1, S_2, \dots, S_n,$$

т.е. осуществится одно из полной группы несовместных событий:

$$S_1^{(k)}, S_2^{(k)}, \dots, S_n^{(k)}.$$

Обозначим вероятности этих событий:

$p_1(1) = P(S_1^{(1)}), p_2(1) = P(S_2^{(1)}), \dots, p_n(1) = P(S_n^{(1)})$ — вероятности после первого шага;

$p_1(2) = P(S_1^{(2)}), p_2(2) = P(S_2^{(2)}), \dots, p_n(2) = P(S_n^{(2)})$ — вероятности после второго шага;

и вообще после k -го шага:

$$p_1(k) = P(S_1^{(k)}), p_2(k) = P(S_2^{(k)}), \dots, p_n(k) = P(S_n^{(k)}).$$

Легко видеть, что для каждого номера шага k

$$p_1(k) + p_2(k) + \dots + p_n(k) = 1.$$

Вероятности $p_1(k), p_2(k), \dots, p_n(k)$ — называются вероятностями состояния. Для любого шага (момента времени $t_1, t_2, \dots, t_k$ или номера $1, 2, \dots, k, \dots$) существуют какие-то вероятности перехода системы из состояния в состояние (некоторые из них могут быть равны нулю, если непосредственный переход за один шаг невозможен). Такие вероятности называются переходными вероятностями. Если обозначить P_{ij} вероятность перехода системы за один шаг из состояния S_i в состояние S_j , а P_{ii} вероятность задержки системы в состоянии S_i , то переходные вероятности P_{ij} можно записать в виде прямоугольной матрицы:

$$\|P_{ij}\| = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{1j} & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & P_{2j} & P_{2n} \\ P_{i1} & P_{i2} & P_{ij} & P_{in} \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{nj} & P_{nn} \end{vmatrix}.$$

Некоторые из переходных вероятностей P_{ij} могут быть равны нулю: это означает, что за один шаг переход из i -го состояния в j -е невозможен. По главной диагонали матрицы переходных вероятностей стоят вероятности P_{ii} того, что система не выйдет из состояния S_i , а останется в нем.

Набор вероятностей

$$Q = \{q_0(1), q_0(2), \dots, q_0(s)\}$$

называют начальным распределением, которое определяет состояние системы в начальный момент времени (т.е. при $t = 0$). Марковские процессы полностью задаются матрицей переходных вероятностей P_{ij} за один шаг и вектором начальных значений

$$Q = \{q_0(1), q_0(2), \dots, q_0(s)\}.$$

На практике значительно чаще встречаются ситуации, когда переходы системы из состояния в состояние происходят не в фиксированные моменты времени, а в случайные моменты времени, которые заранее указать невозможно. Для описания таких процессов в ряде случаев может быть с успехом применена схема марковского случайного процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем. Вероятности состояний удовлетворяют определённым дифференциальным уравнениям, так называемым уравнениям Колмогорова [5]:

$$\frac{dP_{ij}(t)}{dt} = \sum P_{ik}(t)f_{kj}, \quad i, j = 1, 2, \dots$$

— прямая система дифференциальных уравнений,

$$\frac{dP_{ij}(\tau)}{d\tau} = \sum f_{ik}P_{kj}(t), \quad i, j = 1, 2, \dots$$

— обратная система дифференциальных уравнений; f_{ij} — плотность вероятностей перехода.

Решая эти системы уравнений, получают вероятности состояний $p_1(t), p_2(t), \dots, p_N(t)$ как функции времени. Начальные условия устанавливаются из физических соображений в зависимости от того, какое было начальное состояние системы (т.е. $t = 0$).

Как уже было замечено выше, если случайный процесс является марковским, то ряд задач решается сравнительно просто. Однако для того, чтобы теория марковских процессов была применима на практике, необходимо следующее: 1) убедиться, что данный реальный процесс является марковским; 2) показать способ решения уравнений Колмогорова. В данной работе предлагается для этой цели использовать спектральный метод.

$$\frac{dP}{dt} = \begin{bmatrix} P_{11}(t) & P_{12}(t) & \dots & P_{1N}(t) \\ P_{21}(t) & \dots & \dots & P_{2N}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{N1}(t) & \dots & \dots & P_{NN}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \\ \dots \\ p_N(t) \end{bmatrix},$$

$$p_1(t) = \sum_0^{\infty} \pi_{1i} \Psi_i(t) \rightarrow \begin{bmatrix} \pi_{10} \\ \pi_{11} \\ \dots \\ \dots \\ \pi_{1N-1} \end{bmatrix} = \bar{\pi}_1 = S_{\Psi}(p_1(t)),$$

$$p_2(t) = \sum_0^{\infty} \pi_{2i} \Psi_i(t) \rightarrow \begin{bmatrix} \pi_{20} \\ \pi_{21} \\ \dots \\ \dots \\ \pi_{2N-1} \end{bmatrix} = \bar{\pi}_2 = S_{\Psi}(p_2(t)),$$

$$p_3(t) = \sum_0^{\infty} \pi_{3i} \Psi_i(t) \rightarrow \begin{bmatrix} \pi_{30} \\ \pi_{31} \\ \dots \\ \dots \\ \pi_{3N-1} \end{bmatrix} = \bar{\pi}_3 = S_{\Psi}(p_3(t)),$$

$$\frac{d}{dt}P \rightarrow D\bar{\pi}_n,$$

$$\begin{bmatrix} D & 0 & 0 \\ 0 & D & 0 \\ 0 & 0 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\pi}_1 \\ \bar{\pi}_2 \\ \bar{\pi}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11}(t)A(t, t)_{pp} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & p_{nn}(t)A(t, t)_{pp} \end{bmatrix}.$$

В качестве примера применения спектрального метода к моделированию случайных процессов рассмотрим решение системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику изменения вероятностей состояния марковского процесса в условиях нестационарных вероятностей переходов.

Решение системы линейных дифференциальных уравнений спектральным методом

$$\vec{D}\pi + \eta = PA(t, t)_{pp}\pi,$$

Блочно-матричная форма

$$\begin{bmatrix} \vec{D} - PA(t, t)_{pp} \end{bmatrix} \pi = \eta,$$

$$\pi = \begin{bmatrix} \vec{D} - PA(t, t)_{pp} \end{bmatrix}^{-1} \eta = \begin{bmatrix} \bar{\pi}_1 \\ \bar{\pi}_2 \\ \bar{\pi}_3 \end{bmatrix}.$$

Заключение

Анализ динамических процессов, происходящих в геофизической среде под воздействием различных полей, может производиться на основе многообразных математических моделей. Динамические модели с постоянными параметрами часто допускают получение решений в явном виде. Наличие таких возможностей позволяет проследить на аналитическом уровне влияние тех параметров и характеристик, которые определяют природу и развитие процессов во времени. Однако попытка учесть изменение параметров геологической среды, изменяющихся во времени даже в линейном случае, приводит к усложнению выкладок. Если в стационарных случаях применимы методы на основе интегральных преобразований Лапласа, то для нестационарных во времени процессов обращение к преобразованиям интегральной природы часто приводит к уравнениям в свёртках. Это в значительной мере усложняет дальнейшую процедуру решения, делая её длительной и ненадёжной. Тем не менее, даже предположение об изменении некоторых характеристик во времени оставляет многие задачи в рамках класса линейных задач. При этом интегральные преобразования остаются неприемлемыми, но можно указать класс методов, позволяющих получить аналитические зависимости, пригодные для описания процессов в целом. Усложнение условий задачи приводит к некоторому усложнению математического аппарата. В частности, становится необходимым переход от операционного исчисления к операторным методам общей природы.

При рассмотрении марковских процессов с изменяющимися во времени вероятностями смены состояний можно указать конкретные методы исследований: метод изображающих векторов и спектральный метод. Оба метода ориентированы на исследование ортогональных функциональных базисов в пространстве функций с ограниченной энергией, что соответствует физичности получаемых результатов с одной стороны и способствует появлению специального операторного выражения, описывающего геологические явления на конечном промежутке времени. Природа получаемых соотношений такова, что в качестве носителя информации о процессе используются матричные представления линейных операторов. В этих случаях становится возможным привлечение численно-аналитических процедур моделирования, допускающих реализацию на уровне современных компьютерных программ. Использование спектрального метода для решения систем дифференциальных уравнений даёт следующие преимущества:

1. Однородное представление для операций и процедур.
2. Однородное представление одномерных сигналов.
3. Возможность параметрирования структуры.

Особый интерес вызывает тот ряд обстоятельств, который связан с ослаблением временных зависимостей моделей, которые в области операторных представлений сводятся к простым параметрическим связям. Таким образом достигается не только возможность решения задач из более обширного класса, но и возможность накопления информации, что особенно важно для геологических приложений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов И.И. Некоторые вопросы математического моделирования процессов минералообразования. В кн. Математические модели в геологии и геостатистике. М.: Наука, 1973. С. 5–13.
2. Солодовников В.В., Семенов В.В. Спектральный метод расчета нестационарных систем управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1975. 271 с.
3. Солодовников В.В., Семенов В.В. Спектральная теория нестационарных систем управления. М.: Наука, 1974. 335 с.
4. Баруча-Рид А.Т. Элементы теории марковских процессов и их приложения. М.: Наука, 1969. 511 с.
5. Терпугов В.Л. Теория случайных процессов. Томск, 1990. 120 с.

THE GEOPHYSICAL FIELD SIMULATION BY MARKOVIAN PROCESSES

V.A. VolovodenkoAssociate Professor, e-mail: vav@osu.cctpu.edu.ru**N.A. Efremova**Senior Teacher, e-mail: ena@tpu.ru**V.I. Efremov**Engineer, e-mail: ena@tpu.ru

Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, 30, Lenin Avenue

Abstract. The paper discusses the geophysical field simulation. Solution to the problems concerning the study of super long-period processes required the development of new methods of experimental data simulation and analysis. The authors propose the use of the spectral method to solve differential equations to describe the time history of condition probabilities of Markovian processes under unstationary probabilities of transformations. It is stated that Markovian processes are regarded as the major models for real processes in nature since their mechanism is considered to be a reliable one. The use of the spectral method to solve the systems of differential equations has the following advantages: 1. Uniform notion for operations and procedures. 2. Uniform notion for one-dimensional signal and the possibility to parametrize the structure. The number of circumstances related to the weakening of the temporary dependences of the models, which in the sphere of operator expressions come to the simple parametrical bonds are of a particular interest. The suggested method allows to solve more general tasks and to accumulate information crucial for geological supplements. The paper might be of interest for those who deal with the simulations of natural processes.

Keywords: geophysical fields simulation, time history, Markovian processes, unstationary, disordered probabilities, geologic structure, geologic medium, statistic method, structural alteration, grid, random variables, discrete variables, interpolization method, stationary random process, discrete state, constant time, transformation limit.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Е.А. Корчевская

доцент, к.ф.-м.н., e-mail: korchevskaya.elena@tut.by

Л.В. Маркова

доцент, к.ф.-м.н., e-mail: l_v_markova@mail.ru

А.Н. Красоткина

преподаватель кафедры прикладной математики и механики,
e-mail: krasotkina_anna030288@mail.ru

Витебский государственный университет имени П.М. Машерова

Аннотация. Авторами предлагается новый подход к решению основных задач вычислительных методов алгебры на основании принципов объектно-ориентированного проектирования и способов создания параллельных алгоритмов. Все вычислительно-конструктивные понятия линейной алгебры рассматриваются в качестве объектов и представлены единой классификационной иерархией.

Ключевые слова: алгоритмы, параллелизм, программирование, потоки.

Широкое внедрение идей параллелизма в работу вычислительных систем является наиболее перспективным и динамичным направлением увеличения скорости решения прикладных задач.

В настоящее время существует большое количество разнообразных технологий организации параллелизма при разработке приложений в системах с общей памятью. Все они различаются моделями исполнения и планирования распределения нагрузки. От специфики реализуемого алгоритма в большинстве случаев зависит целесообразность применения конкретной технологии.

Создание потоков — это базовый способ достижения параллелизма в приложениях, разрабатываемых для систем с общей памятью. Параллелизм на уровне ядер процессора обеспечивается многопоточностью. Потоки могут решать как однотипные задачи на разных наборах входных данных, так и разнотипные.

Решение больших систем линейных уравнений принадлежит к кругу задач, для которых применение новейшей высокопроизводительной вычислительной техники дает максимальную эффективность.

Придерживаясь основных принципов методологии объектно-ориентированного программирования, авторы разработали иерархии матричных классов и алгоритмов линейной алгебры [1]. Создание конкретного матричного класса сводится к реализации набора операций с элементарными матрицами. Значительная часть операций непосредственно реализуется в верхних

матричных классах. Тем не менее, переопределение их в конкретных классах с учётом частных математических свойств, особенностей конкретных структур данных позволяет при необходимости добиться наибольшей эффективности программного кода. Предложенная авторами классификация элементарных матриц определяет базовый набор матричных преобразований, участвующих в методах линейной алгебры [1].

Матричные операции являются базовыми макрооперациями для многих задач линейной алгебры. Поэтому эффективный параллельный алгоритм операций над матрицами позволяет значительно увеличить размерность подобных задач без увеличения времени их решения.

Используя сформированные иерархические структуры, авторы описали и реализовали алгоритмы распараллеливания основных матричных операций на языке программирования C++ с использованием технологии объектно-ориентированного программирования.

В качестве примера приведём схему параллельного алгоритма произведения квадратных матриц, основанного на блочном представлении матриц:

1. Распределяем по процессорам блоки матриц A , B так, как показано на рисунке 1.
2. Параллельно на всех процессорах системы производим вычисление компонент соответствующих блоков матрицы C .
3. Передаём на один из процессоров все вычисленные блоки и формируем матрицу C .
4. Заметим, кроме того, что легко предложить множество модификаций данного алгоритма:
 - вместо строкового распределения блоков матрицы A по процессорам можно использовать распределение по столбцам;
 - можно использовать разбиение матриц A , B на блоки таким образом, чтобы общее количество блоков было равно количеству процессоров в системе, и каждому процессору назначать вычисление одного блока.

Существует два подхода к анализу времени работы алгоритма: теоретический и практический. В основе теоретического подхода лежит построение и доказательство аналитических оценок трудоёмкости. Данный подход теоретически обоснован, абстрагирован от конкретной вычислительной архитектуры и деталей программной реализации, однако, при таком подходе получить достаточно точные оценки времени работы алгоритма в секундах не возможно. В некоторых случаях необходимо оценить время в стандартных единицах — секундах, минутах, часах, опираясь на конкретную вычислительную архитектуру и средства программирования. В таких ситуациях приходится прибегать к вычислительным экспериментам.

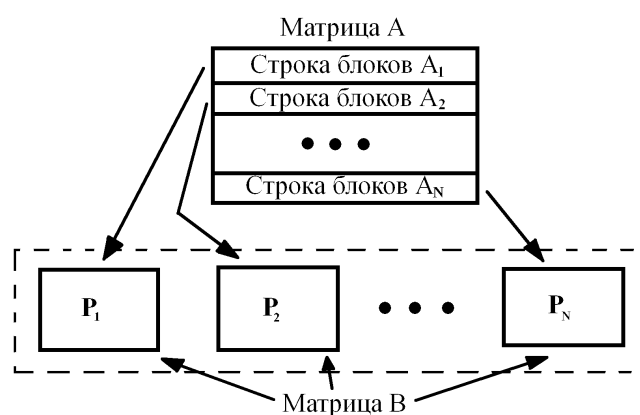


Рис. 1. Блок-схема алгоритма параллельного произведения квадратных матриц

При выполнении вычислительного эксперимента необходимо учитывать следующие моменты: грамотно реализовать замеры времени, подобрать репрезентативные наборы тестовых данных, на которых будут производиться измерения, программную реализацию выбранного алгоритма необходимо адаптировать для вычислительной архитектуры и т.д.

Для анализа времени работы приведённого выше алгоритма был выбран практический подход. Выполнялась серия экспериментов с различными параметрами: размерность матрицы, количество задействованных потоков.

Приведём результаты сравнения последовательного и параллельного умножения квадратных матриц:

Таблица 1. Результаты вычислительного эксперимента

Размерность матрицы	10	50	100	200	1000
Время последовательного умножения	0	0	0.016	0.094	23.744
Время параллельного умножения (кол-во потоков)	0.005(2)	0.005(5)	0.016(5)	0.01033(65)	0.1(75)

Из таблицы видно, что параллельное умножение квадратных матриц имеет преимущество при большой размерности матрицы. В скобках указано оптимальное количество потоков, необходимых для наилучшей работы параллельного алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркова Л.В., Корчевская Е.А., Красоткина А.Н. Объектная реализация методов вычислительной алгебры // Вестник Витебского государственного университета. 2013. В. 74, № 2. С. 18–22.

AUTOMATED SYSTEM FOR DISTRIBUTED COMPUTING FOR NUMERICAL SOLUTION OF ALGEBRAIC PROBLEMS

E.A. Korchevskaya

Associate Professor, Ph.D. (Math.), e-mail: korchevskaya.elena@tut.by

L.V. Markova

Associate Professor, Ph.D. (Math.), e-mail: l_v_markova@mail.ru

A.N. Krasotkina

Senior Teacher, e-mail: krasotkina_anna030288@mail.ru

Vitebsk State University named after P.M. Masherov

Abstract. The authors propose a new approach to solving the fundamental problems of computational algebra methods based on the principles of object-oriented design and how to create parallel algorithms. All computationally design concepts of linear algebra are treated as objects and represented by a single classification hierarchy.

Keywords: algorithms, concurrency, programming streams.

СЦЕНАРНОЕ СТРАТЕГИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ: МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ

О.М. Куликова

к.т.н., доцент, e-mail: aaaaal1@rambler.ru

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, Омск

Аннотация. В статье уточнено определение сценарного стратегического плана, используемого при решении задач оптимального управления сложными динамическими объектами. Приведены математическая постановка задачи и алгоритм построения сценарных стратегических планов.

Ключевые слова: стратегическое управление, сценарный подход, стратегия, стратегический план.

1. Введение

Одной из основных проблем современного руководителя организации является недостаточность или отсутствие достоверной информации о внешней среде предприятия [1, 6, 2], что затрудняет разработку и принятие управленческих решений. Разработанное управленческое решение при недостаточном объёме достоверной информации, реализуемое в условиях высокой неопределённости, гиперконкуренции, и, следовательно, риска, может привести современное предприятие к негативным последствиям, в том числе и к банкротству.

В современных условиях для снижения неопределённости внешней среды при решении задач управления сложными динамическими объектами используются математические методы и алгоритмы, которые могут быть положены в разработку компьютерных алгоритмов и программ.

Одним из основных этапов управления является стратегическое планирование, основная задача которого – разработка алгоритмов действий объекта (предприятия) во времени, увязанных с исполнителями и временными интервалами выполнения, приводящих в долгосрочной перспективе к поставленным целям [1]. Но недостатком традиционного подхода к стратегическому планированию в менеджменте является недостаточный учёт изменчивости внешней среды, поскольку стратегический план представляет собой план последовательного выполнения действий (операций). В настоящее время предпринимаются попытки решить данный вопрос с применением методов кибернетики, логики, математики, теории опционов.

Разработаем алгоритм построения стратегических планов, позволяющих учитывать варианты развития внешней и внутренней сред объекта управления.

2. Математическая постановка задачи

Для учёта вариантов развития внешней и внутренней сред объекта управления используем сценарный подход. Следовательно, варианты развития сред исследуемого объекта описываются с помощью сценариев. Исходя из этого, введём термин, сценарный стратегический план — это множество $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ запланированных возможностей (в теории опционов их называют опционами или реальными возможностями [5, 4]), представленное в форме плана. Каждый элемент множества P характеризуется следующими показателями: а) тип (базовый или вариативный; базовые элементы — возможности превращаются в действия при любом сценарии, вариативные — реализуются при возникновении заданного сценария); б) временной интервал реализации, определяющий начало и конец реализации возможности; в) руководитель и исполнители (они могут меняться во времени и при смене сценариев); г) необходимые ресурсы (для каждого такта времени); д) значения риска; е) необходимые резервы для снижения риска.

Сценарный стратегический план разрабатывается на основании сформированного управленческого решения, заданного в форме множества базовых и вариативных опционов $O = \{o_{b1}, o_{b2}, \dots, o_{bn}, o_{v1}, o_{v2}, \dots, o_{vn}\}$ [2]. Отличием сценарного стратегического плана от разработанного управленческого решения является большая детализация, задание руководителя и исполнителей на каждом этапе, представление в графической форме (например, в форме диаграммы Ганта).

Лежащие в основе сценарного стратегического планирования управленческие решения строятся на основании расчёта матрицы значений управляемых факторов для каждого такта времени $U_j = \|u_{ijt}\|$, где j — номер сценария, t — момент времени, и для каждого сценария. Управляемые факторы выделяются из множества значимых факторов $X_z = \{x_{z1}, x_{z2}, \dots, x_{zn}\}$, которое формируется из множества факторов $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, влияющих на объект управления. Варианты развития сред исследуемого процесса задаются с помощью сценариев, которые определяют изменение сценарных факторов во времени. Сценарные факторы выделяются из множества X , и их значения во времени определяются матрицей $S_j = \|s_{ijt}\|$. Факторы, входящие во множество X , но не принадлежащие к группе сценарных, являются общими — их значения меняются во времени, но не изменяются при смене сценария. Из общих факторов выделяются структурные факторы, лежащие в промежуточных слоях иерархической модели, и связывающие факторы и цели между собой.

Множество $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ формирует совокупность целевых показателей. Значения целевых показателей для каждого такта времени задаются с помощью матрицы целевых показателей $A_j = \|A_{ijt}\|$.

Взаимосвязи между факторами, факторами и целевыми показателями задаются с помощью иерархической модели. В качестве связывающих функций могут быть использованы нейронные или гибридные сети, уравнения регрессии.

При расчёте значений управляемых факторов может быть решена прямая или обратная задача [3]. Прямая задача предполагает расчёт целевых показате-

телей на основании значений управляемых факторов. В основе обратной задачи лежит определение значений управляемых факторов по целевым показателям. В обратной задаче целевые показатели для каждого момента времени либо задаются экспертом или определяются с применением математических методов на основании заданного диапазона допустимых значений управляемых факторов.

3. Алгоритм построения сценарных стратегических планов

Сценарные стратегические планы строятся по следующему алгоритму.

1. Построение UML диаграмм, описывающих функционирование объекта управления.
2. Задание периода управления — T и шага модельного времени — h .
3. Задание множества целевых показателей $A_j = \|A_{ijt}\|$.
4. Задание множества факторов $X = \{x_1, x_2 \dots x_n\}$, влияющих на объект управления. Определение и выбор данных факторов осуществляется на основании экспертного анализа диаграмм UML.
5. Построение множества значимых факторов $X_z = \{x_{z1}, x_{z2} \dots x_{zn}\}$, влияющих на объект управления, с применением регрессионного метода (также для решения данной задачи может быть использовано сочетание нейронных сетей с генетическими алгоритмами).
6. Построение иерархической модели, определяющей связи между значимыми факторами и целевыми показателями.
7. Задание значений общих факторов для каждого такта времени.
8. Построение сценариев.
9. Выбор типа решаемой задачи.
10. Задание допустимого диапазона значений управляемых и структурных факторов, входящих в модель. В случае прямой задачи также задаются и значения управляемых факторов.
11. Расчёт значений целевых показателей. В прямой задаче целевые показатели рассчитываются на основании значений управляемых факторов. В обратной задаче расчёт значений целевых показателей может производиться с применением генетических алгоритмов или экспертного анализа.
12. Расчёт значений управляемых факторов для каждого такта времени при решении обратной задачи.
13. Построение опционов управленческого решения.
14. Разработка сценарного стратегического плана.

4. Заключение

Использование разработанного алгоритма позволит повысить эффективность управления сложными динамическими объектами путём повышения точности и эффективности этапа стратегического планирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казакова Н.А., Александрова А.В., Кондрашева Н.Н., Куратова С.А. Стратегический менеджмент. Учебник. М.: ИНФРА, 2012. 320 с.
2. Куликова О.М. Алгоритм поддержки принятия оптимальных управленческих решений в условиях неопределенности // Наука о человеке. 2013. № 1(11). С. 256–260.
3. Иванов В.Н., Куликова О.М., Трофимова Л.С., Фоменко А.А. Ресурсно-информационная теория поддержки принятия управленческих решений в условиях неопределенности и риска. Омск: ОГИС, 2013. 116 с.
4. Казаковцев В.П., Куликова О.М., Овсянников Н.В. Стратегическое управление и разработка инвестиционных проектов в системе здравоохранения // Российская отоларингология. 2014. № 2(69). С. 39–43.
5. Облой К. Стратегия организации: в поисках устойчивого конкурентного преимущества; пер. с пол. А.Н. Вексин, А.М. Атрашкевич, Н.П. Скибская; науч. ред. Н.Ю. Макаева. Минск: Гревцов Букс, 2013. 384 с.
6. Филимонов В.А. Технологии ситуационного центра для социальной инженерии // Проблемы управления в социальных системах. 2009. Т 1, № 2. С. 63–74.

SCENIC STRATEGIC PLANNING: THE MATHEMATICAL FORMULATION AND ALGORITHMS OF CONSTRUCTION

О.М. Kulikova

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, e-mail: aaaaaa11@rambler.ru

The Siberian State Automobile and Highway Academy, Omsk

Abstract. The article clarified the definition of the strategic plan of the scenario used in the solution of problems of optimal control of complex dynamic objects. The mathematical formulation of the problem and the algorithm for constructing scenarios of strategic plans are shown.

Keywords: strategic control, scenario-based approach, strategy, strategic plan.

МЕТОД ФИКТИВНЫХ ПОТОКОВ В МОДЕЛЯХ ПЕРЕБРОСКИ РЕСУРСОВ

Б.К. Нартов

канд. физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник,
e-mail: nartov@ofim.oscsbras.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математики
им. С.Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Омск

Аннотация. В работе представлен метод расчёта перераспределения начальных и/или текущих ресурсов в широком классе практических задач оптимального управления. Представляемый метод основан на специальном расширении уравнений динамической системы, формализующей исходную задачу. Дополнительные слагаемые правых частей уравнений описывают управляемый коммутатор потоков, связывающий составляющие вектора состояния системы. В пределах заданной интенсивности обмена коммутатор допускает произвольное перераспределение модулей составляющих (ресурсов) при сохранении их текущей суммы. При этом вид функции, мажорирующей интенсивности потоков, определяется типом задачи. В задачах первого типа размещение начальных ресурсов является частью оптимизируемых начальных условий, а перераспределение ресурсов на интервале управления запрещено или физически неосуществимо. В задачах второго типа начальные условия жёстко заданы, но разрешено перераспределять текущие суммарные ресурсы на интервале управления. В задачах третьего типа разрешены как оптимизация начального размещения ресурсов, так и оптимизация перераспределения ресурсов на интервале управления.

Ключевые слова: размещение, перераспределение, ресурсы, потоки, коммутация, динамические системы, нейронные сети.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ,
проекты № 14-08-01132 и № 14-07-00272*

Введение

В настоящей работе предложенный в [1-4] «метод фиктивных потоков» распространён на три основные группы практических задач оптимального управления ресурсами. При этом предполагается, что исходные задачи сведены или могут быть сведены к задачам оптимального управления гладкими динамическими системами. Для наглядности мы ограничились исходными задачами, в которых функционал качества управления является функцией вектора состояния динамической системы. При этом под ресурсами понимается сумма модулей составляющих вектора состояния.

Используемый подход основан на специальном расширении уравнений динамической системы, формализующей исходную задачу. Дополнительные слагаемые правых частей уравнений описывают управляемый коммутатор потоков, связывающий составляющие вектора состояния системы. В пределах заданной интенсивности обмена коммутатор допускает произвольное перераспределение модулей составляющих вектора состояния (ресурсов) при сохранении их текущей суммы. При этом вид функции, мажорирующей интенсивности потоков, определяется типом задачи.

1. Задачи первого типа: оптимизация начального размещения ресурсов

Рассмотрим гладкую управляемую систему

$$\dot{P}_k(t) = f_k(P_1(t), \dots, P_N(t), x(t), t), 1 \leq k \leq N, \quad (1)$$

где $x(t)$ — вектор управления.

Задав далее начальные условия, интервал управления $(0, T)$ и множество управлений X , запишем исходную задачу:

$$J(x^*) = \inf_{x \in X} J(x), \quad (2)$$

$$J(x) = F(P_1(T), \dots, P_N(T)), \quad (3)$$

где F — непрерывно дифференцируема.

Решаемая далее задача состоит в отыскании оптимальных в смысле (1) — (3) значений $P_k(0)$ при типичном ограничении $\sum_{k=1}^N P_k(0) = C$, где C — заданное число.

Рассмотрим предварительно вспомогательную динамическую систему

$$\dot{Z}_k(t) = -U_k(t) \cdot Z_k(t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i(t) \cdot Z_i(t), 1 \leq k \leq N, \quad (4)$$

с заданными начальными условиями $Z_k(0)$, где $U_k(t)$ — задаваемые непрерывные функции.

Обозначим:

$$U(t) = \{U_k(\tau), 1 \leq k \leq N, 0 \leq \tau \leq t\};$$

$$U^+(t) = \{U_k(\tau)/U_k(\tau) \geq 0, 1 \leq k \leq N, 0 \leq \tau \leq t\};$$

$$Z(t) = \{Z_k(t), 1 \leq k \leq N\};$$

$$Z^+(t) = \{Z_k(t)/Z_k(t) \geq 0, 1 \leq k \leq N\};$$

$$Z^-(t) = \{Z_k(t)/Z_k(t) < 0, 1 \leq k \leq N\}.$$

Если $Z_k(t)$ есть характеристики некоторых объектов, то система уравнений (4) описывает управляемый «коммутатор» потоков характеристик из объекта в объект. Первое слагаемое в (4) — поток из k -го объекта в коммутатор, второе слагаемое — поток из коммутатора в k -й объект.

При этом (4) обладает следующими полезными свойствами:

1. При любых начальных условиях $Z(0)$ произвольное управление $U(t)$ сохраняет начальный ресурс C , то есть

$$\sum_{k=1}^N Z_k(t) \equiv \sum_{k=1}^N Z_k(0) = C.$$

2. Любое управление $U^+(t)$ отображает произвольный набор неотрицательных начальных характеристик в некоторый набор неотрицательных конечных характеристик, то есть

$$U^+(t): Z^+(0) \rightarrow Z^+(t),$$

и, более того, для любых двух наборов Z_{1+} и Z_{2+} с совпадающими суммами характеристик и любого t найдётся

$$U^+(t): Z^{1+}(0) \rightarrow Z^+(t) = Z^{2+},$$

то есть для любого заданного времени управления и любых двух заданных наборов неотрицательных характеристик найдётся неотрицательное управление, приводящее первый набор ко второму.

3. Любое управление $U^+(t)$ отображает произвольный набор отрицательных начальных характеристик в некоторый набор отрицательных конечных характеристик, то есть

$$U^+(t): Z^-(0) \rightarrow Z^-(t),$$

и, более того, для любых двух наборов Z^{1-} и Z^{2-} с совпадающими суммами характеристик и любого t найдётся

$$U^+(t): Z^{1-}(0) \rightarrow Z^-(t) = Z^{2-},$$

то есть для любого заданного времени управления и любых двух заданных наборов отрицательных характеристик найдётся неотрицательное управление, приводящее первый набор ко второму.

Рассмотрим теперь следующую модификацию исходной системы уравнений (2):

$$\dot{\tilde{P}}_k(t) = f_k(\tilde{P}_1(t), \dots, \tilde{P}_1(t), x(t), t) - U_k \tilde{P}_k(t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i(t) \tilde{P}_i(t), 1 \leq k \leq N, \quad (5)$$

с начальными условиями и интервалом управления (O, T) из задачи (1) – (3) и множеством управлений $\tilde{X} = X \otimes U$, где $U = \{U^+(t)/0 \leq U_k(t) \leq \varphi(t), 1 \leq k \leq N, 0 \leq t \leq T\}$, где $U_k(0)$ заданы; $\varphi(t)$ — заданная непрерывно убывающая функция.

При этом $H_1 = \inf \varphi(t)$ на интервале $(0, \Delta t)$, $H_2 = \sup \varphi(t)$ на интервале $(\Delta t + \delta, T)$, Δt и δ — регулируются параметрами $\varphi(t)$ независимо. Конкретный вид $\varphi(t)$ вполне произволен.

Рассмотрим далее для системы (5) задачу

$$J(\tilde{x}^*) = \inf_{\tilde{x} \in \tilde{X}} J(\tilde{x}), \quad (6)$$

где

$$J(\tilde{x}) = F(\tilde{P}_1(T), \dots, \tilde{P}_N(T)), \quad (7)$$

(см. (3), (4)).

Используя теперь гладкость исходной системы (1) и исходного функционала качества (3) и свойства вспомогательной системы (4), можно показать, что при исходном ограничении $P_k(0) \geq 0$, $1 \leq k \leq N$ или $P_k(0) < 0$, $1 \leq k \leq N$ для любой исходной задачи вида (1) – (3), соответствующей вспомогательной задачи (5) – (7) и любого $\varepsilon > 0$ найдётся такая $\varphi(t)$, что

$$|P_k^*(0) - \tilde{P}_k(\Delta t + \delta)| < \varepsilon, \quad 1 \leq k \leq N,$$

где $P_k(0)$ — искомые оптимальные начальные характеристики исходной задачи (1) – (3); $\tilde{P}_k(\Delta t + \delta)$ — характеристики из решения задачи (5) – (7), взятые в момент $\Delta t + \delta$.

Мы рассмотрели задачи первого типа, в которых размещаемые начальные ресурсы являются частью оптимизируемых начальных условий, а перераспределение ресурсов на интервале управления запрещено или физически неосуществимо [4, 5].

В этом случае мажорирующая функция $\varphi(t)$ допускает произвольный обмен ресурсами в начальном интервале времени $(0, \Delta t)$, малом по сравнению с интервалом управления $(0, T)$, а затем блокирует обмен. В результате решение модифицированной исходной задачи, взятое в конце малого начального интервала $(\Delta t + \delta, T)$, содержит вектор состояния, сколь угодно близкий к искомому оптимальному начальному вектору состояния исходной задачи.

2. Задачи второго типа: перераспределение ресурсов на интервале управления

В задачах второго типа начальные условия жёстко заданы, но разрешено перераспределять текущие суммарные ресурсы на интервале управления. В этом случае мажорирующие функции постоянны на всём интервале управления, а их значения определяются физическими ограничениями на интенсивности потоков. Таким образом, решение модифицированной исходной задачи содержит, дополнительно, план оптимального перераспределения ресурсов на интервале управления, фактически реализуемый затем в реальном масштабе времени. Так, при расширении метода на некоторые транспортные задачи линейного программирования вспомогательная задача модифицирует матрицу перевозок в течение $(0, T)$ при $\varphi(t) = \text{const}$.

3. Смешанные задачи третьего типа

В задачах третьего типа разрешены как оптимизация начального размещения ресурсов, так и оптимизация перераспределения ресурсов на интервале управления. В этом случае мажорирующая функция $\varphi(t)$ является комбинацией мажорирующих функций задач первого и второго типов (на интервалах $(0, \Delta t)$ и $(\Delta t + \delta, T)$, соответственно). При этом итоговое управление исходной задачи реализуется по следующей схеме:

1. В начальные условия подставляются значения $\tilde{P}_k(\Delta t + \delta)$ из решения вспомогательной задачи (5)–(7).

2. Затем на интервале $(0, T - \Delta t - \delta)$ реализуется управление из интервала $(\Delta t + \delta, T)$ вспомогательной задачи (5)–(7).

Заключение

1. Решение вспомогательной задачи (5)–(7) позволяет получить оптимальные начальные характеристики $P_k^*(0)$ исходной задачи (1)–(3) за один шаг, однако цена дополнительных ограничений и численного представления функции $\varphi(t)$ в реализующем алгоритме может в конкретном случае оказаться неприемлемой.

2. Представленный метод распространяется и на задачи оптимального размещения начальных ресурсов неуправляемых гладких систем. При этом функционал качества (3) записывается в виде

$$J(x) = F(P_1(T), \dots, P_N(T)) = \tilde{F}(P_1(0), \dots, P_N(0), T).$$

3. Во многих исходных задачах управления часть начальных составляющих вектора состояния в (1) является неоптимизируемыми параметрами. В этом случае в системе (5) вспомогательной задачи (5)–(7) модифицируются дифференциальные уравнения лишь тех составляющих, начальные значения $P_k(0)$ которых могут оптимизироваться.

4. Предлагаемый подход использовался нами в моделировании конфликтов управляемых подвижных объектов. В числе других возможных приложений можно указать транспортные задачи линейного программирования, задачи планирования и управления физическими экспериментами и управление вычислительными ресурсами. Так, например, он обсуждался применительно к имитации и управлению физическими экспериментами в контексте работ [6–8]. При этом было отмечено, что простейший коммутатор (4) можно интерпретировать как замкнутую нейронную сеть непрерывного функционирования с весами синапсов, оптимизируемыми внешней задачей.

5. Хотя представленный приём назван «методом фиктивных потоков», он позволяет оптимизировать управление как фиктивными (в задачах оптимизации начальных условий), так и реальными физическими потоками ресурсов (материальных, энергетических, информационных).

ЛИТЕРАТУРА

1. Nartov B.K. Conflict of Moving Systems. France: AMSE-Press, 1994. 87 p.
2. Нартов Б.К., Чуканов С.Н. Модели траекторного управления. Омск: Изд-во ОмГУ, 2001. 95 с.
3. Нартов Б.К. Методы траекторного управления. Новосибирск: Наука, 2003. 104 с.
4. Нартов Б.К. Метод фиктивных потоков // Математические структуры и моделирование. Омск: ОмГУ. 2001. Вып. 8. С. 40–43.
5. Нартов Б.К. Оптимальное размещение управляемых подвижных объектов на заданных начальных позициях // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 2. С. 14–19.
6. Barabanov M.Yu., Vodop'yanov A.S., Chukanov S.N., Nartov B.K., Yamaleev R.M. and Babkin V.A. A search for radially excited charmonium states in experiments with low-energy antiproton beams // Russian Physics Journal. 2007. V. 50, N. 12. P. 1243–1250.
7. Barabanov M.Y., Vodopianov A.S., Dodokhov V.Kh., Chukanov S.N., Nartov B.K., Yamaleev R.V. Application of low energy antiproton beams for charmonium hybrid studies // Hadronic Journal. 2009. V. 32, N. 2. P. 159–179.
8. Barabanov M.Y., Vodopyanov A.S., Dodokhov V.K. Search for higher lying charmonium states and charmed hybrids in experiments using antiproton beam with momentum ranging from 1 gev/c to 15 gev/c // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2011. V. 8, N. 10. P. 1069–1072.

THE METHOD OF FICTITIOUS FLOW IN MODELS OF TRANSFER OF RESOURCES

B.K. Nartov

Ph.D. (Math.), Associate Professor, Senior Researcher, e-mail: nartov@ofim.oscsbras.ru

Omsk Branch of Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Omsk

Abstract. This paper presents a method for calculating the redistribution of the initial and / or ongoing resources in a wide range of practical problems optimal control. The presented method is based on a special extension of the dynamic equations of the system, formalizes the original problem. — Additional terms of the right sides of the equations describing the managed switch in currents linking the components of the system state. Within a given intensity-sharing switch allows arbitrary reallocation of module components (resources) while maintaining their current amount. The form of the function, majorizing flow rate, determined by the type of task. In problems of the first type of accommodation is a part of the initial resources optimization initial conditions, and the reallocation of resources to the control interval is prohibited or physically impossible. In problems of the second type of initial conditions are hard coded, but allowed to re-allocate current total resources to control interval. In problems of the third type are allowed as the initial optimization of resource allocation and reallocation of resources to optimize the range of management.

Keywords: accommodation, allocation, resources, streams, switching, dynamic systems, neural networks.

This work supported by RFBR, projects N 14-08-01132, N 14-07-00272

МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ АЛГОРИТМА ВИОЛЫ-ДЖОНСА

А.Р. Нургатин

аспирант, e-mail: nurgatin@csu.ru

Челябинский государственный университет

Аннотация. На данный момент существует множество методов обнаружения объектов на изображении, к примеру, метод Виолы-Джонса. Однако практически все эти методы основаны на вычислении свёртки с определённым паттерном. Такой подход ведет к существенному возрастанию объёма вычислений при увеличении размеров исходной сцены, что делает его малоприменимым в системах реального времени и ограниченных вычислительных мощностях. В статье предлагается метод улучшения алгоритма Виолы-Джонса, позволяющий снизить вычислительные нагрузки без ущерба точности. Для данного метода также показаны результаты тестирования, демонстрирующие его применимость.

Ключевые слова: алгоритм Виолы-Джонса, распознавание образов, обнаружение лиц, системы реального времени.

Введение

Метод Виолы-Джонса, являющийся на данный момент одним из самых популярных алгоритмов обнаружения объектов на изображениях, основан на принципе сканирующего окна. Это ведёт к увеличению объёма требуемых вычислений с увеличением размера обрабатываемого изображения, что нехорошо при обработке в реальном времени. В данной статье предлагается эффективный подход решения данной проблемы без потери точности.

1. Описание метода Виолы-Джонса

Основные принципы, на которых основан метод, таковы:

- используются изображения в интегральном представлении [1], что позволяет вычислять быстро необходимые объекты;
- используются признаки Хаара [2], с помощью которых происходит поиск нужного объекта (в данном контексте – лица и его черт);
- используется бустинг [3] для выбора наиболее подходящих признаков для искомого объекта на данной части изображения;
- все признаки поступают на вход классификатора [2], который даёт результат «верно» либо «ложь»;
- используются каскады признаков для быстрого отбрасывания окон [4], где не найдено лицо.

2. Обзор существующих решений

На данный момент имеется несколько оптимизаций алгоритма Виолы-Джонса [5, 6, 7], но данные решения требуют значительных инженерных усилий, во многом оптимизация сводится к более оптимальной реализации алгоритма на заданной платформе.

Другой способ добиться работы алгоритма в реальном времени — реализация на GPU [4]. Однако это решение непрактично для применения во встраиваемых системах

В работе [8] авторы предлагают решение на основе реализации из OpenCV, оптимизированное для встраиваемых систем, но сама реализация остаётся неизменной. Предлагаемая в статье оптимизация улучшает скорость работы алгоритма за счёт снижения объёма вычислений с сохранением точности.

В работе [9] авторы рассматривают метод, основанный на модели визуального поиска для быстрого обнаружения объектов. Сравнив свою работу с детектором Виолы-Джонса в OpenCV, они получили ускорение в среднем в 2 раза за счёт небольшого снижения точности. Подход предлагается для использования с изображениями, содержащими только одно лицо, и не ясно как применять такой подход к изображениям с несколькими лицами.

3. Адаптивный метод сканирования для алгоритма Виолы-Джонса

В методе Виолы-Джонса окно двигается по изображению с шагом сканирования Δ . Предлагается использовать различные размеры шага по оси x и y : Δ_x , Δ_y . В случае $\Delta_x = \Delta_y$ будем по-прежнему использовать обозначение Δ . Шаг сканирования влияет как на точность обнаружения, так и на пропускную способность. С увеличением шага уменьшается вероятность ложного срабатывания в однородных областях. Также возможно увеличение скорости работы алгоритма за счёт увеличения шага сканирования в тех областях, где объект отсутствует. В существующих реализациях размер шага, как правило, выбирается $\Delta = 1$ или $\Delta = 2$.

Назовём ступенью выхода номер классификатора в каскаде, на котором данное окно отвергается. В представленном анализе выявляется взаимосвязь наличия лица в области изображения и ступени выхода.

На рисунке 1 каждый пиксель имеет яркость обратно пропорциональную ступени выхода.

Данный подход позволяет увеличивать размер шага при малых значениях ступени выхода и увеличивать его при приближении к объекту поиска. Также данный подход позволяет избежать дополнительных расходов на нормализацию подокна. Данная нормализация необходима для минимизации влияния различных условий освещения в методе Виолы-Джонса [2, 8].

На рисунке 2 рассмотрен постоянный шаг $\Delta_x = 2$ или $\Delta_x = 3$, видно, что детектор не в состоянии разместить окно в локальном максимуме, в отличие от адаптивного шага Δ .

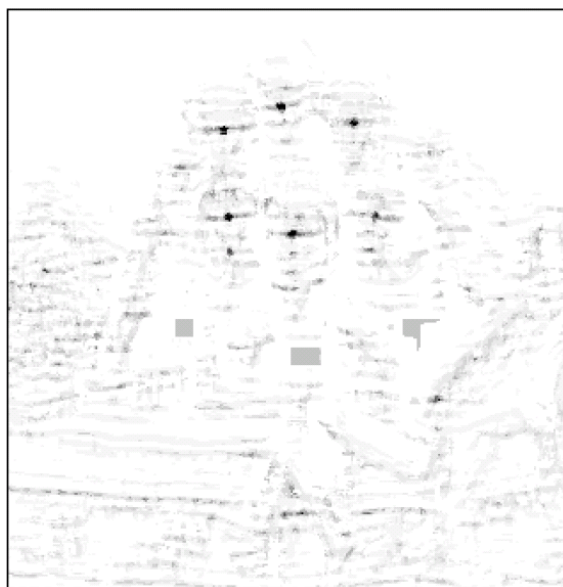


Рис. 1. Окно сканирования отвергается на равномерных областях, не содержащих искомый паттерн, раньше. При приближении же к лицу ступень выхода начинает возрастать

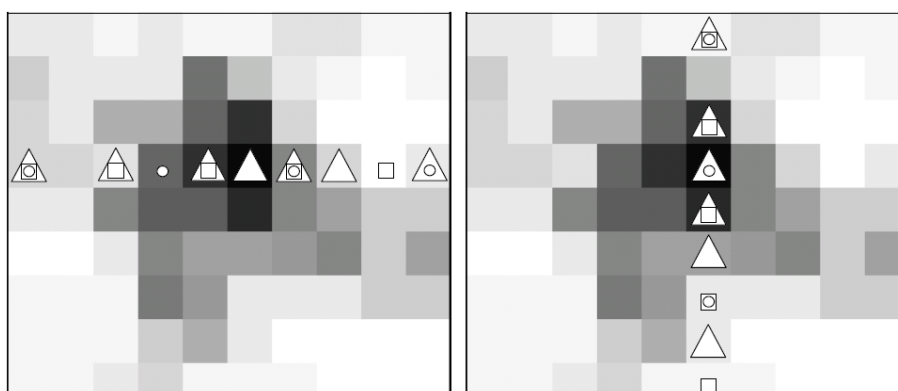


Рис. 2. Различные Δ . Серые блоки — увеличенные пиксели от 204 до 213 (ось x) и от 144 до 122 (ось y). Чёрный пиксель в позиции (209,117) соответствует правому нижнему лицу на рисунке 1

4. Результаты

Эксперименты проводились на Intel Core i7 с тактовой частотой 2.2 ГГц. Использовалась база лиц CMU+MIT [10].

Реализованы следующие подходы:

1. (I) статическая: Δ_x и Δ_y постоянны и равны 1, 2 или 3;
2. (II) OpenCV 1: $\Delta_x = 2$ для всего изображения. В случае не обнаружения лица Δ_x уменьшается на 1, $\Delta_y = 1$;
3. (III) OpenCV 2: $\Delta = 1$, если соотношение размеров оригинального изображения и уменьшенного более чем 2, иначе $\Delta = 2$.

В тестах также использовались коэффициент масштабирования

(scalingfactor) s и порог слияния (merging threshold) γ такие, что $s \in \{1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5\}$ и $\gamma \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$.

Для сравнения получаемых результатов используются следующие метрики:

$$recall = \frac{TP}{TP + EN}; precision = \frac{TP}{TP + FP},$$

где TP — число правильно определённых объектов, EN — число пропущенных объектов, FP — количество ложных срабатываний.

Полученные результаты сравниваются в Паретовском смысле.

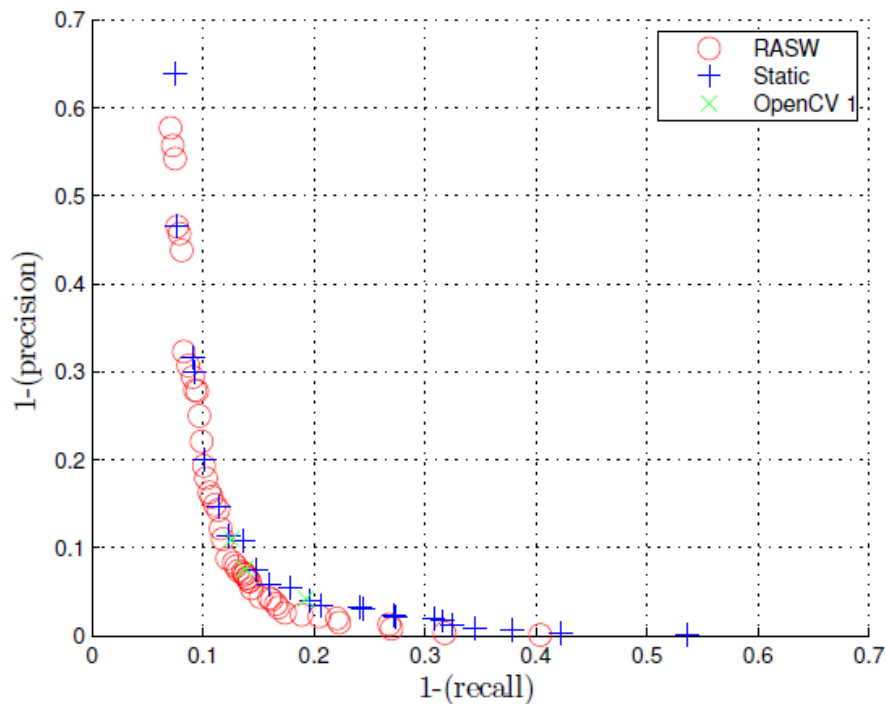


Рис. 3. Результаты тестирования: метрики — отзыв и точность

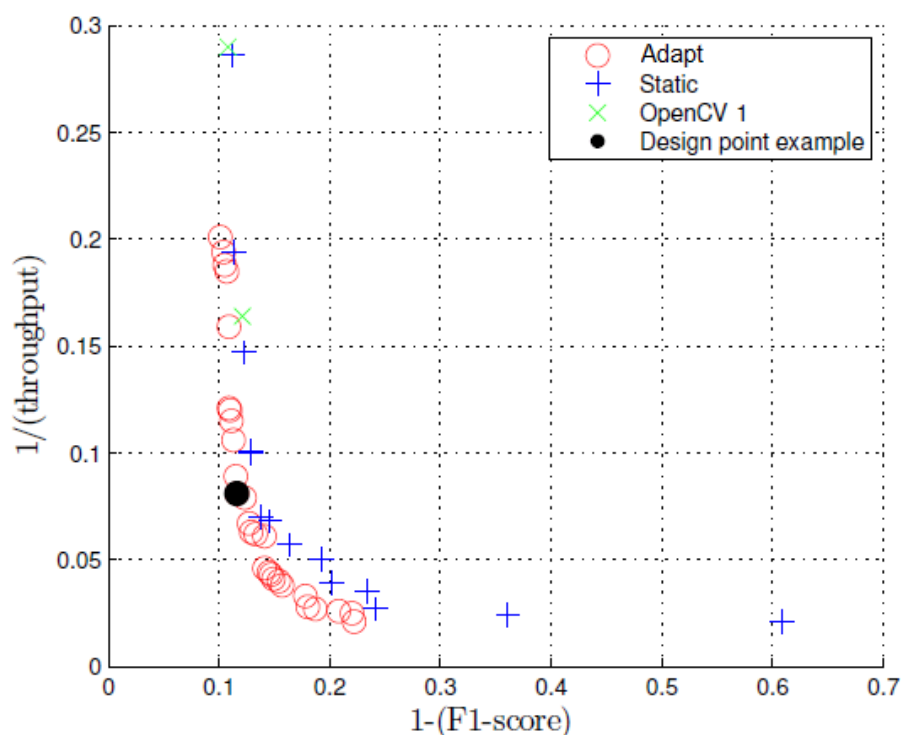
Для удобства введём метрику $F1$ [11]:

$$F1 = 2 \times \frac{precision \times recall}{precision + recall}.$$

По сути $F1$ — средневзвешенное отзыва и точности.

5. Заключение

В данной статье предлагается использовать адаптивное сканирующее окно для улучшения процесса обнаружения объекта алгоритмом Виолы-Джонса. Представлены результаты для реализации детектора лиц Виолы-Джонса, но данная оптимизация может быть применена для любого алгоритма обнаружения объектов, в котором используются сканирующее окно и каскадный классификатор. По сравнению с существующими подходами, адаптивный обеспечивает лучшие показатели в пространстве $recall/precision$, что особенно важно

Рис. 4. Результаты тестирования. Метрика: $F1$

для систем реального времени. При захвате изображения с видео может быть принята во внимание также и временная неоднородность для ещё большего снижения объёма вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Phan Th., Sohoni S., Chandler D.M. Performance-Analysis-Based Acceleration of Image Quality Assessment.
2. Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. CVPR, 2001.
3. Hefenbrock D., Oberg J., Thanh N., Kastner R., Baden S. Accelerating Viola-Jones face detection to FPGA-level using GPUs. FCCM, 2010.
4. Oro D., Fernandez C., Saeta J.R., Martorell X., Hernando J. Real-time GPU-based face detection in HD video sequences. ICCV Workshops, 2011.
5. Cho J., Benson B., Mirzaei S., Kastner R. Parallelized architecture of multiple classifiers for face detection. ASAP, 2009.
6. Hiromoto M., Sugano H., Miyamoto R. Partially parallel architecture for Adaboost-based detection with haar-like features. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., 2009. T. 19.
7. Brousseau B., Rose J. An energy-efficient, fast FPGA hardware architecture for OpenCV-compatible object detection. FPT, 2012.
8. Acasandrei L., Barriga A. Accelerating Viola-Jones face detection for embedded and SoC environments. ICDSC, 2011.

9. Butko N.J., Movellan J.R. Optimal scanning for faster object detection. CVPR, 2009.
10. Rowley H., Baluja S., Kanade T. Neural network-based face detection. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell, 1999.
11. Goutte C., Gaussier E. A probabilistic interpretation of precision, recall and f-score, with implication for evaluation. ECIR, 2005.
12. Zhang C., Zhang Z. A survey of recent advances in face detection. Technical report MSR-TR-2010-66, 2010.
13. Tek S.C., Gokmen M. GPU accelerated real-time object detection on high resolution videos using modified census transform. VISAPP, 2012.
14. Lampert C., Blaschko M., Hofmann T. Beyond sliding windows: object localization by efficient subwindow search. CVPR, 2008.

ADAPTATION FOR VIOLA-JONES METHOD

A.R. Nurgatin

Graduate Student, e-mail: nurgatin@csu.ru

Chelyabinsk State University

Abstract. In recent years, there has been developed many algorithms to identify objects in images, including the scheme offered by Viola and Jones. However, as in all of the algorithms based on a scanning window, if the size of screen grows the amount of computation increases too. The paper proposes a method of increasing the speed without sacrificing accuracy. This paper also demonstrates the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: Viola-Jones method, object recognition, adaptation, pattern recognition, face detection, window-scanning, real-time system.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА АВТОТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ

А.М. Пуртов

доцент, к.т.н., с.н.с. ОФ ИМ СО РАН, e-mail: andr.purtov@yandex.ru

Аннотация. Разработан способ применения таксономии, редукции графов и методов геоинформационных систем для анализа влияния задержек на время прохождения маршрутов в автотранспортных сетях. Технология демонстрируется на примере анализа популярного маршрута г. Омска. Приведён пример использования таксономии для анализа результатов редукции графа. Показано сходство результатов визуальной и автоматической таксономии. Результаты таксономии отображены на ГИС – карте графа маршрута. Разработана имитационная модель перекрёстка. Модель запрограммирована на GPSSW.

Ключевые слова: геоинформационная система, имитационное моделирование, редукция графов, таксономия, анализ данных, автотранспортные сети.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-07-00149-а

Введение

Рост возможностей приобретения автомобилей населением приводит к перегрузке автотранспортных сетей. Поэтому задачи анализа и организации автодорожного движения становятся все более актуальными. Современные компьютерные технологии и математические методы имеют большие возможности для решения такого рода задач. Интеграция различных методов и средств позволяет с разных сторон посмотреть на возникающие проблемы. Создаваемая автором система GisAuto ориентирована на анализ времени прохождения различных участков пути. В GisAuto предполагается совместное использование методов геоинформационных систем (ГИС), математических методов, в частности, методов редукции графов, таксономии, имитационного моделирования. В [1–3] более подробно, чем в предлагаемой статье, показана эффективность интеграции перечисленных методов. Начало широкого использования ГИС для отображения и решения проблем на транспорте можно отнести к концу прошлого века. Представляемая работа ориентирована на анализ времени прохождения маршрутов с целью оперативного управления транспортными потоками и стратегического планирования автотранспортной сети. Суть разрабатываемой технологии можно отобразить следующими этапами.

1. Построение ГИС-модели задержек на основных маршрутах города. Задержки происходят на перекрёстках, светофорах, пешеходных переходах.
2. Построение на ГИС-карте графов исследуемых маршрутов.
3. Сбор данных о задержках. На этом этапе могут быть использованы экспертные, расчётные оценки, результаты наблюдений, имитационного моделирования.
4. Анализ маршрутов методом редукции графов. В результате получаются коэффициенты, показывающие влияние каждой задержки на общую задержку при прохождении маршрута.
5. Раскраска задержек (вершин графа) на ГИС-карте в зависимости от их значимости.
6. Анализ полученных результатов. Выявление задержек и участков, оказывающих наибольшее влияние на время прохождения маршрута.
7. Микроанализ проблемных участков (дополнительные наблюдения, имитационное моделирование).

В статье на примере анализа одного из популярных маршрутов г. Омска показано выполнение перечисленных этапов. Новизна разрабатываемой технологии заключается в оригинальном сочетании разработанных автором моделей, реализованных различными методами.

1. Построение ГИС-модели задержек и графов маршрутов

ГИС-модель задержек на дорогах разрабатывается с целью предоставления первичных данных для анализа транспортных сетей различными методами (аналитическое и имитационное моделирование, геоанализ). Подробно ГИС-модель задержек и построение графов маршрутов описаны в [1]. Основными объектами модели являются задержки и участки дорог. Выделены следующие типы задержек: перекрёсток, светофор, пешеходный переход. Остановки пассажирского транспорта в модели не учитываются. Если на переходе имеется светофор, задержка перед ним относится к типу «светофор». Если перекрёсток оборудован светофорами, задержки на нем относятся к типу «перекрёсток». Участки дорог соединяют задержки. На основе ГИС-модели задержек строятся графы маршрутов. Для перемещения между двумя точками могут использоваться разные пути. На основе множества основных путей получается граф маршрута. В левой части рис. 1 показаны основные задержки на дорогах г. Омска. В правой части рис. 1 показан граф одного из популярных маршрутов г. Омска (п. Солнечный — завод Баранова).

ГИС-модель задержек и граф маршрута реализованы средствами пакета GIS ArcView 3.0.

2. Анализ маршрутов методами ГИС и редукции графов

Метод редукции графов для анализа вычислительных процессов в ЭВМ был предложен Б. Байцером [4]. Редукция заключается в свёртке (последовательном упрощении) графа с помощью замен фрагментов графа разработанными



Рис. 1. ГИС-карта задержек и граф маршрута

упрощающими подстановками. В дальнейшем метод Б. Байцера был модифицирован В.Н. Задорожным [5]. Примеры двух из восьми подстановок приведены на рис. 2.

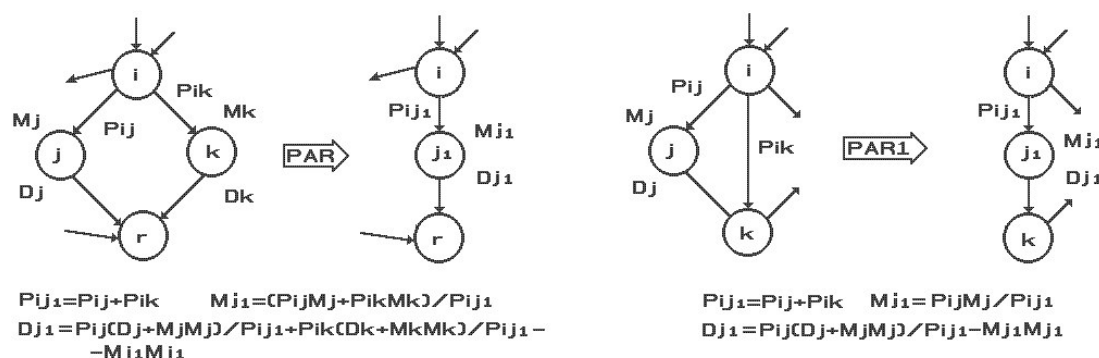


Рис. 2. Примеры упрощения и свертывания

Программная реализация метода была сделана автором статьи.

Суть метода заключается в следующем. Оценки математического ожидания времени (T_i) и дисперсии (D_i) задержек, вероятностей выбора в узлах путей следования (P_{ij}) задаются на входе программы редукции графов. На выходе программы получаются значения средней задержки при прохождении маршрута (T), дисперсии $T(D)$, коэффициентов чувствительности T и D к параметрам задержек и вероятностям переходов (десять коэффициентов). Для получения оценки среднего времени прохождения маршрута необходимо к T добавить время свободного пробега (без задержек). Наиболее простую и физически объяснимую интерпретацию имеют абсолютный коэффициент чувствительности T к T_i ($K_a[T, T_i]$) и относительный коэффициент чувствительности T к T_i ($K_b[T, T_i]$). Дело в том, что при предположении о независимости параметров

исходного графа, $K_a[T, T_i]$ представляет собой частную производную T по T_i , интерпретируемую как вероятность реализации задержки T_i при прохождении маршрута. Выполняется равенство:

$$T = \sum_{i=1}^n K_a[T, T_i] T_i, \text{ где } n — \text{число вершин графа.}$$

Разделив обе части равенства на T , получаем сумму $K_b[T, T_i]$, равную 1. Таким образом, коэффициент $K_b[T, T_i]$ показывает в долях от 1 вклад задержки T_i в общую задержку T . Учитывая свойства $K_b[T, T_i]$, будем называть его коэффициентом значимости задержки. Другие коэффициенты чувствительности не имеют такой простой интерпретации. Тем не менее, они иногда оказываются полезными для оценки влияния параметров T_i , D_i , P_{ij} на T и D . Ранее метод использовался автором статьи для анализа процессов передачи данных в компьютерных сетях [6]. Подробно применение метода для анализа автотранспортных сетей описано в [1].

Целью анализа является сравнительная оценка величин задержек и вероятностей выбора участков дорог с точки зрения степени их влияния на общую задержку при прохождении маршрута. Для достижения цели выполняются следующие действия:

1. Выбирается точка А (первая задержка на маршруте) и точка Б (последняя задержка на маршруте).
2. На ГИС-карте задержек выбираются те задержки и участки дорог, по которым обычно движется автотранспорт из точки А в точку Б (маршрут АБ).
3. Средствами GIS ArcView автоматически создаются слой задержек и слой участков дорог, относящихся к маршруту АБ. Слои отображаются на ГИС-карте. В результате получается граф маршрута АБ (рис.1).
4. Определяются (различными доступными методами) и записываются в базу данных оценки исходных параметров графа T_i , D_i , P_{ij} .
5. Исходные параметры графа подаются на вход программы редукции графов.
6. На выходе программы редукции графов получают оценки параметров T , D и значения коэффициентов чувствительности.
7. Выбираются интересные для исследователя коэффициенты чувствительности. Создаются слои, на которых задержки и участки дорог изображаются в зависимости от значений соответствующих коэффициентов чувствительности.
8. Проводится геоанализ по всем полученным результатам (по результатам одного или нескольких экспериментов, по результатам анализа одного или нескольких маршрутов).
9. Результаты анализа представляются для обсуждения и принятия решений.

На рис. 3 показаны результаты анализа графа, представленного на рис. 1. Задержки изображены в зависимости от значения коэффициента $K_b[T, T_i]$.



Рис. 3. Коэффициенты значимости задержек на маршруте

В левой части рисунка показан весь маршрут, в правой части изображена центральная часть г. Омска. Как выше было сказано, $K_b[T, T_i]$ в долях от единицы показывает вклад задержки в общее время прохождения маршрута. Поэтому $K_b[T, T_i]$ называем коэффициентом значимости. На рис. 3 чем больше коэффициент, тем крупнее точка (данные разбиты на 3 категории). Кресты показывают задержки, оказывающие наибольшее влияние на время прохождения маршрута. Рисунок на уровне города наглядно показывает степень влияния каждой из задержек на общую задержку при прохождении маршрута.

Существуют задержки, значимые для нескольких маршрутов. На рис. 4 отображены коэффициенты $K_b[T, T_i]$ участков маршрутов 1 и 2 в центре г. Омска. Маршрут 1 — от Радиостанции (на пр. Мира) до ж.д. вокзала. Маршрут 2 — от п. Солнечный до завода Баранова. Для маршрута 1 коэффициенты $K_b[T, T_i]$ изображены белыми окружностями. Для маршрута 2 — крестами. Чем больше $K_b[T, T_i]$, тем крупнее символ. Из рис. 4 видно, например, что задержка на пересечении ул. Красный путь и ул. Фрунзе наиболее значима для обоих маршрутов.

3. Использование таксономии для анализа задержек

По классификации задач анализа данных, предложенной Н. Г. Загоруйко [7], таксономия (классификация, кластеризация, категоризация) заключается в разделении «объектов по схожести их свойств». При этом в шкале наименований каждая группа похожих объектов как-то обозначается. Основным научно-практическим направлением в таксономии является автоматизация классификации в многомерном пространстве параметров (признаков). В настоящее время нет универсального алгоритма таксономии, «который мог бы составить реальную конкуренцию человеческой способности к обобщению» [8].

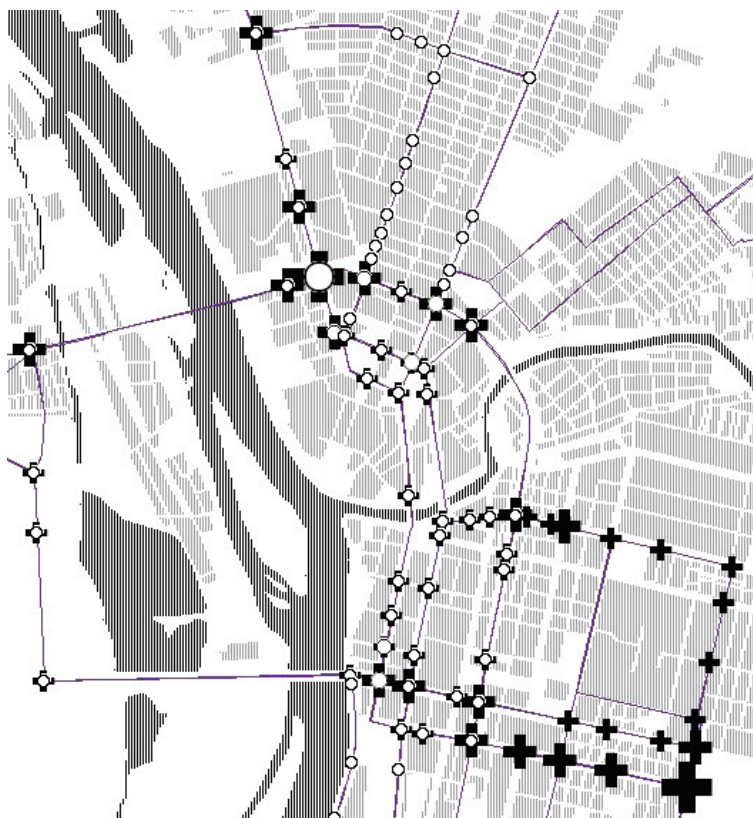


Рис. 4. Коэффициенты значимости задержек на двух маршрутах

Поэтому для таксономии в GisAuto используются автоматическая таксономия и предложенный автором статьи метод визуальной таксономии средствами ГИС [9].

Для автоматической таксономии студенткой СибАДИ Охотниковой К.В. при выполнении дипломной работы создана в среде C++ Builder программа, реализующая алгоритмы FOREL, FOREL-2, KOLAPS [7]. В статье приведены результаты использования визуальной таксономии и алгоритма FOREL-2, суть которого заключается в следующем.

В алгоритме FOREL-2 таксоны имеют форму гиперсферы (два параметра — круг, три параметра — шар). Параметры объектов считаются их координатами в n -мерном пространстве. Параметры нормируются, приводятся в единый диапазон, например, от 0 до 1. Считается, что чем больше объекты похожи друг на друга, тем ближе расположены в пространстве соответствующие им точки. Тогда задача таксономии состоит в том, чтобы выявить сгустки точек и объединить их в подмножества с похожими параметрами. В алгоритме FOREL-2 на входе задаются ограничение на допустимое количество таксонов, максимальный и минимальный радиусы гиперсферы. Оптимальным считается то разбиение, при котором минимальна сумма расстояний точек до центров таксонов.

При визуальной таксономии выбирается пара параметров объектов. Норми-

рованные параметры считаются координатами объектов на плоскости. Средствами ГИС с помощью геометрических фигур произвольной формы (круг, прямоугольник, многоугольник), используя выбранные критерии, точки, соответствующие объектам, объединяются в таксоны.

Основное преимущество автоматической таксономии по сравнению с визуальной заключается в возможности выявления похожести объектов в n -мерном пространстве. Кроме ограниченности двумерным представлением параметров к недостаткам визуальной таксономии можно отнести субъективизм разбиения на таксоны. С другой стороны, визуальная таксономия имеет следующие преимущества по сравнению с автоматической:

- возможность использования эвристических процедур при разбиении на таксоны;
- быстрый переход от одних критериев классификации к другим;
- более простая и логичная интерпретация результатов таксономии.

На рис. 5 представлено визуальное и автоматическое разбиение задержек на таксоны. Пунктирные линии обозначают вычисленные средние арифметические значения параметров задержек T_i и $K_b[T, T_i]$. Визуальное разбиение на таксоны показано геометрическими фигурами. При разбиении использовались критерии близости (кучности, похожести) и величины отклонения от среднего. Использование средних значений упрощает интерпретацию результатов. Например, в первый таксон попали задержки со средними значениями параметров, во втором таксоне — задержки с высокими значениями параметров, в третьем таксоне — задержки с высоким значением T_i и средним значением $K_b[T, T_i]$. Таксон 3 показывает, что не все большие задержки существенно влияют на время прохождения маршрута. Это из-за малой вероятности реализации этих задержек.

Результаты автоматической таксономии показаны разными формами точек. Например, мелкие точки попали в один таксон, треугольники в другой. В левой части рис. 5 представлены результаты автоматической таксономии по алгоритму FOREL-2 с использованием параметров T_i и $K_b[T, T_i]$. Возник вопрос о том, как изменятся результаты таксономии, если обработать алгоритмом FOREL-2 три параметра. На вход программы таксономии были поданы значения параметров T_i , $K_b[T, T_i]$ и $K_a[T, T_i]$. В правой части рис. 5 показаны результаты таксономии в плоскости параметров T_i и $K_b[T, T_i]$. В результате учёта параметра $K_a[T, T_i]$ в число влиятельных добавились три задержки (обозначенных квадратами), имеющие высокую вероятность реализации.

На основе результатов, представленных на рис. 5, можно сделать выводы:

- в рассматриваемом случае визуальная таксономия мало отличается от автоматической;
- таксономия по двум параметрам мало отличается от таксономии по трём параметрам.

На рис. 6 показано изображение задержек на маршруте в зависимости от номера таксона, в который они попали при визуальной таксономии.

Кресты и крупные точки показывают наиболее значимые задержки (таксоны 2 и 5). Квадраты (таксон 3) иллюстрируют задержки с большим T_i , но редко

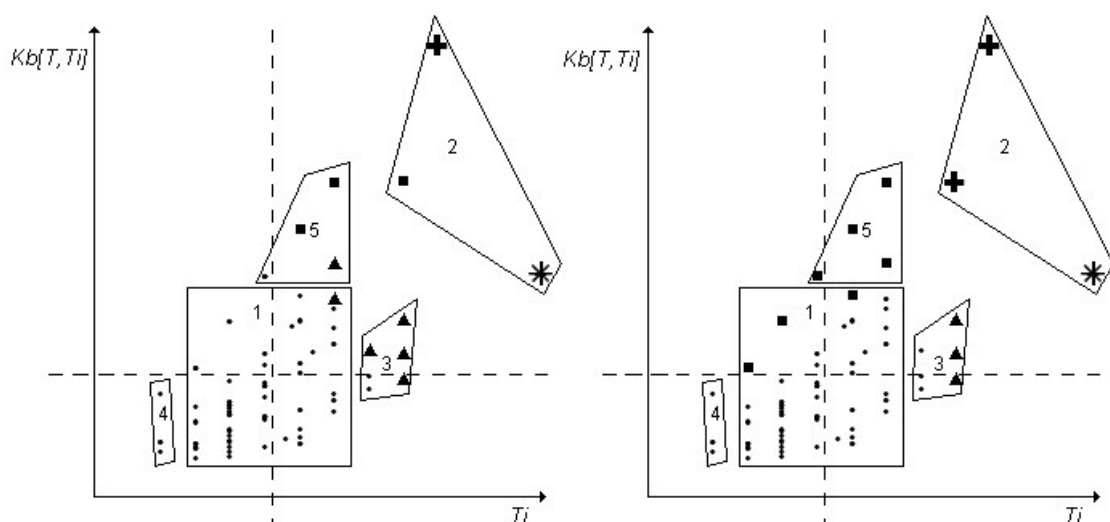


Рис. 5. Визуальная и автоматическая таксономии

реализуемые. Мелкие точки (таксоны 1 и 4) обозначают задержки, относительно слабо влияющие на прохождение маршрута. Разумеется, здесь речь не идёт о спонтанно возникающих на дорогах пробках. Изображение задержек и их значимости на реальной карте позволяет использовать эвристические методы анализа данных и принятия решений при развитии транспортной сети. Более подробно использование таксономии в GisAuto изложено в [2].

4. Имитационная модель перекрёстка

Имитационное моделирование может использоваться как при оценке исходных данных для указанных выше методов, так и для детального анализа полученных результатов. Разработанная концептуальная модель перекрёстка демонстрируется на рис. 7. Реальные перекрёстки имеют множество разных конфигураций, полос и направлений движения, способов размещения светофоров. Предлагаемая модель достаточно универсальна. Она позволяет с помощью упрощений отобразить большинство перекрёстков (за исключением самых сложных).

На перекрёстке в каждом направлении существует очередь, управляемая светофорами. В моделях на уровне классических систем массового обслуживания тонкости управления светофорами обычно не учитываются. В предлагаемой модели очереди зависят не только от задержек и интенсивностей поступления транзактов, но и от СУС. Предлагаемая модель не учитывает такие детали, как перестроение автомобилей в другой ряд, поведение водителей, ДТП. Для построения моделей более детальных, чем предлагаемая, используются другие методы, например, метод клеточных автоматов. Для поставленных в работе целей, связанных с оценкой задержек автомобилей перед перекрёстком, слишком детальные модели не требуются.



Рис. 6. Изображение результатов таксономии на графе маршрута

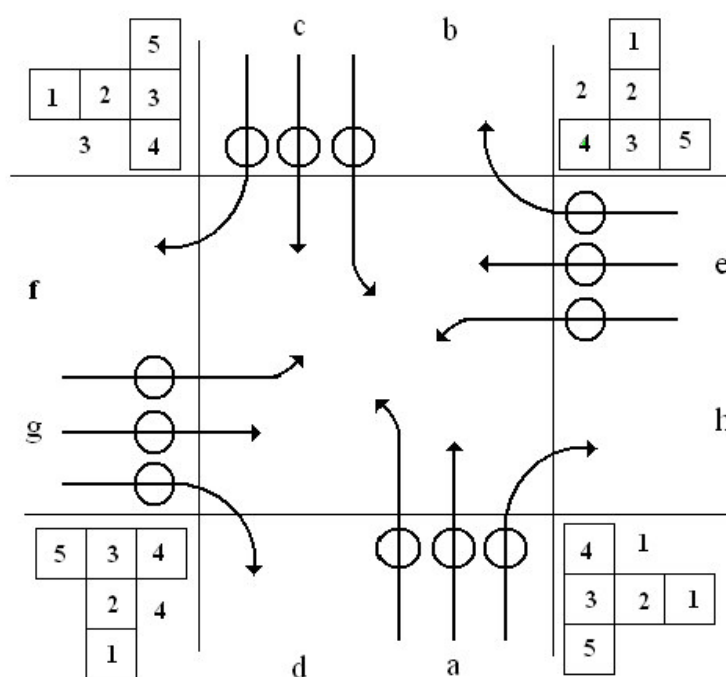


Рис. 7. Модель перекрестка

Интенсивность поступления автомобилей на перекрёсток (интенсивность генерации транзакций) в каждом из направлений зависит от предыдущей задержки (предыдущий светофор, переход). Концептуальная модель перекрёстка реализована автором статьи на GPSSW (студенческая, свободно распространяемая версия). Более подробно модель, а также проведённые эксперименты описаны в [3].

Разработанная имитационная модель может быть использоваться как в составе GisAuto для микроанализа перекрёстков, так и автономно, например, для сравнения алгоритмов управления светофорами и потоками автомобилей.

Заключение

В статье на примере разрабатываемой системы GisAuto показана эффективность совместного использования ГИС-технологии и математических методов при анализе автотранспортных сетей. Дальнейшее развитие GisAuto связано с модернизацией разработанной технологии и включением в неё других методов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пуртов А.М. Интеграция технологии ГИС и метода редукции графов для анализа транспортных сетей // Омский научный вестник. 2011. № 1(97). С. 164–168.
2. Пуртов А.М. Использование таксономии при анализе задержек в автотранспортных сетях // Вестник СибАДИ. 2013. № 2(30). С. 73–78.
3. Пуртов А.М. Разработка и анализ имитационной модели перекрёстка для системы GisAuto // Омский научный вестник. 2013. № 1(117). С. 225–229.
4. Байцер Б. Микроанализ производительности вычислительных систем: Пер. с англ. / Под ред. В.В. Мартынюка. М.: Радио и связь, 1983. 360 с.
5. Задорожный В.Н., Мызникова Т.А. Рекурсивный анализ чувствительности для метода Байцера. Деп. в ВИНТИ, 1988. № 5490-B88.
6. Пуртов А.М. Анализ производительности сетей ЭВМ на графах и имитационных моделях.: Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук (05.13.16) / Науч. рук. В.А. Шапцев. Омск: ИИТПМ СО РАН, 1995. 17 с.
7. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 1999. 270 с.
8. Борисова И.А., Загоруйко Н.Г. Функции конкурентного сходства в задаче таксономии. Знания-Онтологии-Теории (ЗОНТ-07). Сб. науч. тр. Т. 2. Новосибирск, 2007. С. 67–76.
9. Пуртов А.М. Использование ГИС-технологии и таксономии для визуального анализа данных о субъектах РФ // Знания-Онтологии-Теории (ЗОНТ-09): материалы конф. с междун. участием. Т. 2. (Новосибирск, 22-24 окт. 2009 г.). Новосибирск: Изд-во ИМ СО РАН, 2009. С. 207–211.

USE OF COMPUTER TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL METHODS FOR THE ANALYSIS OF AUTO-TRANSPORT NETWORKS

A.M. Purtov

Associate Professor, Ph.D. (Eng.), e-mail: andr.purtov.yandex.ru

Branch of Sobolev Institute of Mathematics of Siberian Branch of Russian Academy of
Sciences

Abstract. The way of application of taxonomy, reduction of graphs and geoinformation systems methods is developed for the analysis of routes in transport networks. The technology is shown on examples of the analysis of popular routes of Omsk. The example of use of taxonomy for the analysis of results of a reduction of graphs are shown. Similarity of results of visual and automatic taxonomy is shown. Results of taxonomy are represented on GIS — map of the graph of delays. The imitating model of crossroads is developed. The model is programmed on GPSSW.

Keywords: geoinformation system, simulation, reduction of graphs, taxonomy, analysis of data, auto transport networks.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Б.И. Пякилля

аспирант, e-mail: pakillaboris@gmail.com

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Аннотация. В работе предложен метод получения математической модели линейного объекта на примере решения задачи идентификации управляемой робототехнической системы. Метод основан на применении частного случая преобразования Лапласа и численных методов решения систем линейных алгебраических уравнений.

Ключевые слова: передаточная функция, робот, робототехническая система, идентификация, линейная система, преобразование Лапласа.

Введение

Проблема получения математической модели исследуемого объекта или системы имеет огромное теоретическое и практическое значение. Адекватная математическая модель, а, значит, и точное описание свойств объекта, позволяет понять и спрогнозировать его дальнейшее поведение, а также синтезировать оптимальное управление. Построение математической модели реального промышленного объекта на основе физических законов нередко осложнено невозможностью применения этих законов или их излишней сложностью. В инженерных приложениях часто возникает задача, когда имеется некоторый набор данных в виде массивов значений входных и выходных сигналов и на их основе требуется построить модель типа «вход-выход», используемую в дальнейшем для синтеза регуляторов. Для построения таких моделей используются методы идентификации систем, являющейся специальным разделом теории автоматического управления, и позволяющей на основе специальных алгоритмов получить математические модели динамических систем по данным наблюдений. В данной работе будет рассмотрена конкретная задача построения математической модели робототехнической системы, представленной в виде подвижного звена промышленного робота [1]. Выбор в качестве исследуемого объекта робототехнической системы обусловлен тем, что такие системы имеют большое значение для промышленного производства, а, значит, представляют интерес для теории автоматического управления и её приложений. Правильно построенная система автоматического управления на основе полученной математической модели робототехнической системы позволит оптимально управлять объектом с точки зрения быстродействия или затрат энергии, что приведёт к повышению эффективности производства.

Далее подробно опишем используемый метод идентификации, который будет использоваться для решения поставленной задачи.

1. Описание метода идентификации

Для получения математической модели был выбран метод идентификации, основанный на применении вещественного интерполяционного метода (ВИМ) [2,4,5], доказавшего свою эффективность и небольшие вычислительные затраты.

ВИМ принадлежит к методам, оперирующим с математическими описаниями в области изображений. Основой метода является вещественное интегральное преобразование:

$$F(\delta) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-\delta t} dt, \delta \in [C, \infty), C \geq 0, \quad (1)$$

где оригиналу $f(t)$ ставится в соответствие изображение $F(\delta)$, представленное как функция вещественной переменной δ . Формулу (1), являющуюся прямым преобразованием, можно рассмотреть как частный случай преобразования Лапласа, связанный с заменой переменной: комплексной $p = \delta + j\omega$ на вещественную δ .

Использование преобразования (1) для решения задачи идентификации, как и в базовом случае применения преобразования Лапласа, связано с определением передаточной функции $W(p)$ по известным сигналам входа $x(t)$ и выхода $y(t)$. Отличие заключается в переходе к вещественным изображениям $W(\delta)$, $X(\delta) = L\{x(t)\}$, $Y(\delta) = L\{y(t)\}$, $\delta \in [C, \infty), C \geq 0$. На основе этих моделей формируется уравнение $Y(\delta) = W(\delta)X(\delta)$, в котором присутствует искомая функция $W(\delta)$.

Далее, имея математическое выражение вида

$$W(\delta) = \frac{\int_0^{\infty} y(t)e^{-\delta t} dt}{\int_0^{\infty} x(t)e^{-\delta t} dt}, \quad (2)$$

можно найти вещественную передаточную функцию $W(\delta)$. Переход к передаточной функции по Лапласу осуществляется формальной заменой вещественной переменной δ на комплексную p в соответствии с рекомендациями [2, 4].

Практическое применение соотношения (2) требует ещё двух пояснений. Во-первых, в практических задачах входные и выходные сигналы $y(t)$, $x(t)$ заданы своими отсчётами $y(t_i)$, $x(t_i)$, $i = 1 \dots n$. Эта особенность требует перехода в формуле (2) к численному интегрированию, что делается достаточно просто. Во-вторых, технология ВИМ использует численные расчёты. Поэтому по формуле (2) ищется предварительно так называемая численная характеристика:

$$\{W(\delta_i)\}_\eta = \{W(\delta_1), W(\delta_2), \dots, W(\delta_\eta)\}, \quad i = 1, \dots, \eta,$$

которая является численной формой математического описания динамического объекта [2, 4], позволяя значительно сократить объем вычислений по сравнению с традиционными методами.

С учётом сказанного расчётная формула принимает вид:

$$W(\delta_i) = \frac{\int_0^\infty y(t)e^{-\delta_i t} dt}{\int_0^\infty x(t)e^{-\delta_i t} dt}, i = 1, \dots, \eta. \quad (3)$$

Математическая модель в форме численной характеристики объекта управления и исходная непрерывная вещественная передаточная функция имеют однозначную связь [4]. Она устанавливается при помощи системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), в которой количество неизвестных параметров $m + n$ равно количеству точек интерполяции η :

$$\begin{cases} W(\delta_1) = \frac{b_m \delta_1^m + b_{m-1} \delta_1^{m-1} + \dots + b_1 \delta_1 + b_0}{a_n \delta_1^n + a_{n-1} \delta_1^{n-1} + \dots + a_1 \delta_1 + 1}, \\ \dots \\ W(\delta_\eta) = \frac{b_m \delta_\eta^m + b_{m-1} \delta_\eta^{m-1} + \dots + b_1 \delta_\eta + b_0}{a_n \delta_\eta^n + a_{n-1} \delta_\eta^{n-1} + \dots + a_1 \delta_\eta + 1}. \end{cases}$$

При выполнении несложных условий СЛАУ имеет решение, и оно единственное [2, 4, 5].

Изложенные основы вещественного интерполяционного метода и его применения к задаче идентификации позволяют перейти к рассмотрению конкретной задачи получения математической модели и её решению.

Применение метода идентификации

За экспериментальные данные была взята переходная характеристика двух-массового подвижного звена робота IRB 1400 фирмы ABB [1]. Характеристика эта получена путём изменения управляющего момента вращения вала электродвигателя и записи с помощью датчиков полученной угловой скорости вращения звена. Наличие помех в измерительном тракте обуславливает её колебательный и «неровный» характер. Однако свойство ВИМ, а именно процедура самого вещественного интегрального преобразования (2, 3), позволяет получать адекватную математическую модель в условиях небольших помех измерений [3]. Вид характеристики представлен на рисунке 1. За математическую модель, адекватно описывающую поведение звена, выбрана передаточная функция:

$$W(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1},$$

где $n \leq 3$, $m < 3$.

Таблица 1. Результаты идентификации

$W_a(p)$	$\Delta h_{\%}$
$\frac{10}{0,015p + 1}$	24,59
$\frac{0,051p + 10}{8,4 \cdot 10^{-7}p^2 + 0,024p + 1}$	17,52
$\frac{-4,71 \cdot 10^{-5}p^2 + 0,1p + 10}{2,1 \cdot 10^{-5}p^2 + 0,0325p + 1}$	21,84
$\frac{0,07p + 10}{4,03 \cdot 10^{-8}p^3 + 8,1 \cdot 10^{-6}p^2 + 0,02p + 1}$	19,5
$\frac{0,0008p^2 + 0,03p + 10}{5,3 \cdot 10^{-7}p^3 + 0,0001p^2 + 0,02p + 1}$	9,9

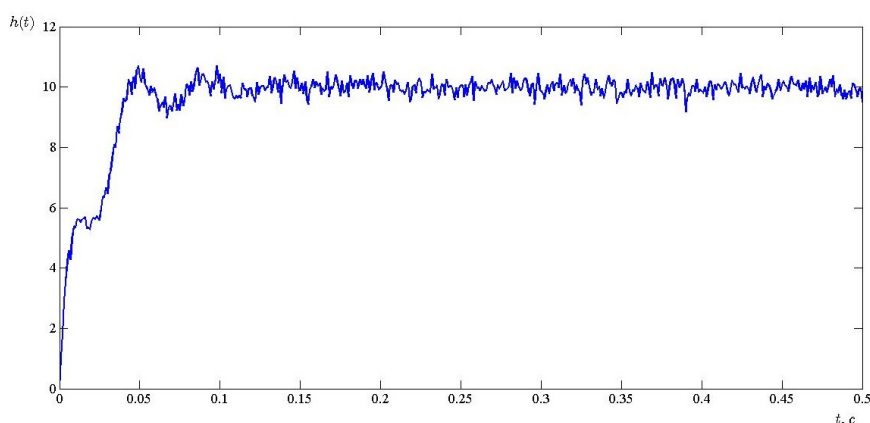


Рис. 1. Переходная характеристика подвижного звена

Выбор такого вида передаточной функции обусловлен возможностью представления исследуемого объекта в виде линейной системы без потери точности описания.

Используем предложенный алгоритм идентификации, основанный на использовании ВИМ. При проведении процедуры идентификации учтём, что нам известно конечное значение переходной характеристики, а, значит, и коэффициент усиления исследуемого объекта $k = 10$. За величину, характеризующую качество полученной модели, был взят критерий Чебышёва:

$$\Delta h_{\%} = \frac{\max_{i \in [1, n]} |y_m(t_i) - y(t_i)|}{y_{\max}},$$

где $y_{\max}$ — максимальное значение выходного сигнала. Результаты идентификации при различных значениях порядка числителя и знаменателя представлены в виде таблицы 1.

Таким образом, наиболее точно двухмассовое подвижное звено описывается передаточной функцией с параметрами $n = 3$, $m = 2$.

Заключение

В результате проделанной работы была получена математическая модель робототехнической системы в виде передаточной функции третьего порядка, используя вещественный интерполяционный метод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Måns Östring Identification, Diagnosis, and Control of a Flexible Robot Arm // Linköping Studies in Science and Technology. Thesis № 948, 2002.
2. Вещественный интерполяционный метод в задачах автоматического управления: учебное пособие / А.С. Алексеев, А.А. Антропов, В.И. Гончаров, С.В. Замятин, В.А. Рудницкий. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 219 с.
3. Пякилля Б.И., Гончаров В.И. Идентификация линейной динамической системы при случайных возмущениях [Электронный ресурс] // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Томск, 13-16 Ноября 2012. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. С. 252–253.
4. Belikmaier M.Y., Goncharov V.I. Correctors for automatic control systems: Synthesis by uniform approximation // Automation and Control, 1997. N. 58(5). P. 715–721.
5. Goncharov V. Rudnicki V. Real interpolation method in automatic control systems self-adjustment problem // Systems Science. 2010. Vol. 36, N. 3. P. 35–37.

IDENTIFICATION OF ROBOT SYSTEM'S MATHEMATICAL MODEL

B.I. Pyakillya

Graduate Student, e-mail: pakillaboris@gmail.com

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk

Abstract. In this paper a method of obtaining the linear mathematical models in case of robot system identification is presented. The method is based on special case of Laplace transform and numerical methods for the solution of linear algebraic equations.

Keywords: transfer function, robot, robot system, system identification, linear system, Laplace transform.

МОДЕЛЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ РАЗРЫВЕ ПЛАСТА

Е.В. Рабинович

профессор, д.т.н., e-mail: erabinovich1952@gmail.com

К.С. Ганчин

студент, e-mail: k.lemmini@gmail.com

И.М. Пупышев

к.ф.-м.н., e-mail: iluxal@ngs.ru

Г.С. Шефель

к.ф.-м.н., e-mail: ligrlx@yahoo.com

Новосибирский государственный технический университет,
факультет автоматики и вычислительной техники

Аннотация. Представлены результаты экспериментального и теоретического исследования оригинальной модели сейсмического импульса. Предложенный импульс возникает при формировании трещины в процессе гидравлического разрыва пласта. Приведено сравнение с известными сейсмическими импульсами.

Ключевые слова: сейсмический импульс, гидравлический разрыв пласта.

Введение

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) является эффективным средством увеличения темпов отбора нефти из продуктивных пластов и более полной выработки месторождения. Он создаёт в пласте высокопроводящий канал для поступления в скважину дополнительной нефти.

Суть ГРП заключается в том, что в забое скважины путём закачки жидкости создаётся давление, превышающее горное давление. В породе продуктивного пласта происходит мгновенный разрыв, и образуются трещины (поверхности фрактального вида). Продолжение закачки влечёт увеличение размеров зоны трещиноватости. Вместе с жидкостью в трещины пласта транспортируется расклинивающий агент, который после снятия давления удерживает трещины в закреплённом раскрытом состоянии.

Проведение ГРП сопряжено с риском дорогостоящего гидродинамического контакта скважин. Снижение этого риска осуществляется при помощи мониторинга ГРП, который на основе обработки возникающих в процессе ГРП сейсмических сигналов позволяет следить за пространственным развитием зоны трещиноватости. Мониторинг даёт информацию для управления основными параметрами ГРП — объёмом и темпами закачки жидкости в пласт.

Для мониторинга ГРП в [1–4] предложен оригинальный метод локации точечных источников акустических колебаний, возникающих в кратковременные моменты образования трещин в породе продуктивного пласта. Применение метода обеспечивает подавление искусственных и естественных помех, возникающих из-за нелинейности распространения сейсмического сигнала и резонансных свойств породы коллектора.

Метод основан на использовании антенны, которая представляет собой сейсмостанцию с 48 сейсμοприёмниками, расположенными в двух пересекающихся направлениях. Антенна сканирует узлы трёхмерной сетки, виртуально наложенной на зону трещиноватости. Каждый сейсμοприёмник антенны регистрирует принятый сейсмический сигнал в виде временной функции — исходной сейсмограммы. Для каждого узла виртуальной сетки локации вычисляется суммарная сейсмограмма, накапливающая вклад всех исходных сейсмограмм.

На интервалах заданной длительности T суммарная сейсмограмма $y(t)$ рассматривается как колебание, имеющее вид суммы известного квазидетерминированного сейсмического импульса $s(X, t)$ и помехи $n(t)$ с априорно известными вероятностными характеристиками:

$$y(t) = \delta s(X, t) + n(t), 0 \leq t \leq T.$$

Здесь случайная величина δ , принимающая только два значения 1 или 0, X — текущая координата сейсмического импульса.

Локация точечного источника сейсмического импульса осуществляется при помощи алгоритма оптимального обнаружения сигналов, который по значению параметра δ оценивает факт наличия ($\delta = 1$) или отсутствия ($\delta = 0$) импульса $s(X, t)$ в конкретной реализации $y(t)$ на интервале T .

Узлы сетки, которым сопоставлен точечный источник сейсмического импульса, используются для построения динамической модели зоны трещиноватости продуктивного пласта. Эта модель — тонкий слой неравномерной толщины в объёме коллектора пласта — результат мониторинга ГРП, определяющий положение, размеры и динамику развития трещин.

Локация точечного источника сейсмического импульса является типичной задачей обнаружения сигнала на фоне помех. Для её решения необходима информация о виде функции $s(X, t)$.

С целью определения формы и параметров сейсмического импульса $s(X, t)$ было проведено экспериментальное исследование акустического колебания, возникающего при разрушении образца породы коллектора. Предложена модель сейсмического импульса, возникающего при образовании трещины коллектора в процессе проведения ГРП. Проведено её сравнение с известными моделями сейсмических импульсов.

Результаты исследования модели сейсмического импульса, возникающего при образовании трещины в продуктивном пласте, приведены в данной работе.

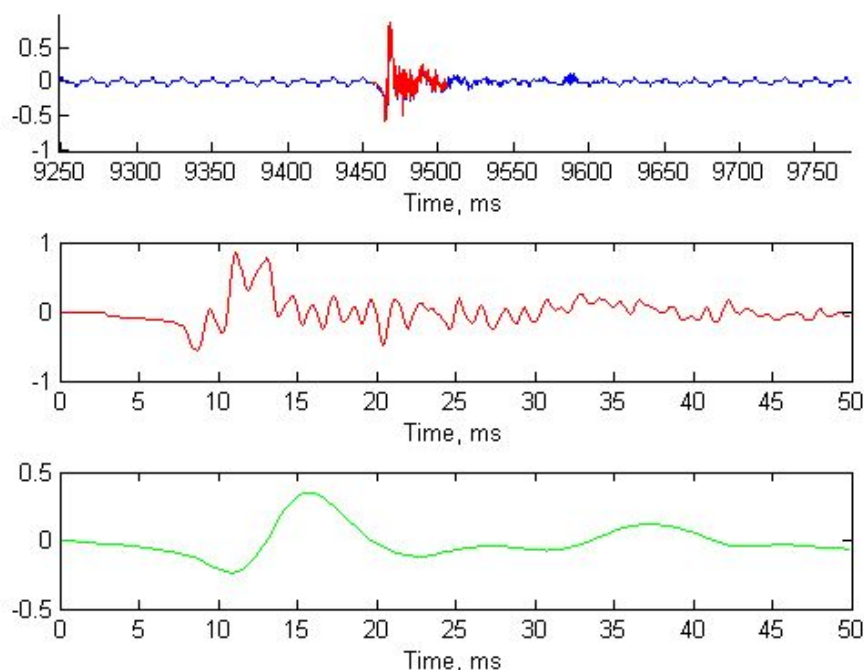


Рис. 1. Акустический импульс

1. Экспериментальное моделирование акустического импульса

Эксперимент состоял в записи звуковых сигналов, возникающих при разрушении (путём раздавливания прессом) кернов образца породы, составляющей продуктивный пласт реального месторождения углеводородов.

Разрушение производилось с помощью механического пресса, запись сопутствующих звуковых сигналов осуществлялась в монофоническом режиме с дискретизацией 8 кГц.

На рис. 1 в верхнем окне красным цветом выделен акустический сигнал разрушения керна. Во втором окне — сигнал в увеличенном масштабе представляет собой радиоимпульс — высокочастотное колебание, модулированное по амплитуде низкочастотным импульсом (огибающей). В третьем окне рис. 1 изображена низкочастотная огибающая акустического радиоимпульса. Понятно, что погрешности проведения эксперимента, его адекватность процессам, происходящим в продуктивном пласте под землёй, дают возможность только весьма приблизительного определения формы и параметров сейсмического импульса $s(X, t)$.

2. Волновая модель сейсмического импульса

При мониторинге ГРП в коллекторе продуктивного пласта наблюдается сложное сочетание процесса развития магистральной трещины и сейсмических событий, создающих помехи мониторингу.

Развитие магистральной трещины можно считать последовательностью актов трещинообразования, распространяющейся по направлениям минимальной прочности породы коллектора. В каждом акте происходит разрыв породы коллектора в зоне повышенных напряжений у острия трещины.

Скачкообразный разрыв породы сопровождается возбуждением акустического колебания в локализованном пространстве острия трещины. Такое импульсное колебание (треск) порождает, при наличии дисперсии волн в породе, волновой пакет — сейсмическую волну, огибающая которой локализована в пространстве.

Поскольку размеры зоны разрыва породы коллектора много меньше расстояния до сейсмоприёмников, то с высокой достоверностью разрыв можно считать точечным источником [5] сейсмических импульсов в пространстве продуктивного пласта. Сейсмические импульсы распространяются с известной скоростью в конкретной среде и регистрируются на поверхности Земли сейсмоприёмниками.

Сейсмический импульс (волновой пакет) является решением соответствующего нелинейного эволюционного уравнения, описывающего напряжённо-деформированные состояния породы продуктивного пласта. Обычно решения таких уравнений ищутся в виде нелинейных волн стационарного профиля, в которых зависимость от координаты и времени определяется единым выражением $(X - Vt)$, где V — групповая скорость волны, движущейся в направлении X .

Исходя из формы акустического импульса, полученного при экспериментальном моделировании, и решений известных нелинейных эволюционных уравнений, была предложена модель сейсмического импульса в виде

$$s(X, t) = cA \frac{\cos(kX - \omega t + \theta)}{\operatorname{ch}\left(\frac{X - Vt}{T_0}\right)},$$

где c — коэффициент пропорциональности, зависящий от вида эволюционного уравнения, A и T_0 — амплитуда и длительность импульса, $X = x - x_0$ — расстояние между сейсмоприёмником и источником импульса, $\omega = kv$ — угловая частота, которая равна произведению волнового числа k и фазовой скорости волны v , θ — фазовый сдвиг волны.

Спектр импульса вычисляется по формуле

$$\begin{aligned} s(X, \Omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} s(X, t) \exp(-i\Omega t) dt = \\ &= \frac{\pi cA}{2V} \left(\frac{\exp\left(-i\left(\left(k - \frac{\omega}{V}\right)X + \theta\right)\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{\pi T_0(\omega + \Omega)}{2V}\right)} + \frac{\exp\left(i\left(\left(k - \frac{\omega}{V}\right)X + \theta\right)\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{\pi T_0(\omega - \Omega)}{2V}\right)} \right) \exp\left(\frac{-i\Omega X}{V}\right), \end{aligned}$$

его энергия

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(X, t) dt = \frac{c^2 A^2}{V} \left(\pi T_0 \frac{\omega}{V} \frac{\cos \left(2 \left(k - \frac{\omega}{V} \right) X + \theta \right)}{\operatorname{sh} \left(\pi T_0 \frac{\omega}{V} \right)} + 1 \right).$$

В зависимости от дисперсионных свойств породы продуктивного пласта рассмотрены решения трёх эволюционных уравнений.

Дисперсия волн отсутствует. Решение — волновой пакет стационарного профиля волнового уравнения с параметрами: $c = A = 1$, $T_0 = 0.049\omega$, $V = v = \pm 1$.

Дисперсия волн слабая. Решение — солитон модифицированного уравнения Кортевега-де Фриза с параметрами $c = \sqrt{24}$, $A = \frac{1}{T_0}$, $V = 3k^2$.

Дисперсия волн сильная. Решение — солитон нелинейного уравнения Шрёдингера с параметрами: $c = \sqrt{2}$, $A = \frac{1}{T_0}$, $V = 2k$.

3. Сравнение моделей сейсмических импульсов

В сейсморазведке для приближения реальных сейсмограмм используется несколько разных моделей сейсмических импульсов:

1. Берлаге: $w(t) = t^n \exp(-bt) \sin(\omega t)$.
2. Гельфанда: $w(t) = \exp(-bt^2) \sin(\omega t)$.
3. Затухающей синусоиды: $w(t) = \exp(-bt) \sin(\omega t)$.
4. Пузырёва: $w(t) = \exp(-\frac{\omega}{\pi} t)^2 \sin(\omega t)$.
5. Риккера: $w(t) = (1 - 2(\frac{\omega}{2} t)^2) \exp(-(\frac{\omega}{2} t)^2)$.

На рис. 2 для сравнения приведены нормированные временные формы и частотные спектры перечисленных выше моделей сейсмических импульсов и предложенной модели в виде солитона нелинейного уравнения Шрёдингера. Для сравнения несущая частота $\frac{\omega}{2\pi}$ импульсов выбрана равной 1 Гц. Значения дополнительных параметров импульсов:

1. $b = 5, n = 6$.
2. $b = 3$.
3. $b = 2$.

Предложенная модель благодаря подбору фазового сдвига θ может принимать вид нуль-фазовых (импульсы 1, 3 и 5) и минимально-фазовых (импульсы 2 и 4) сейсмических импульсов.

Рисунки показывают высокое сходство предложенной и всех остальных моделей сейсмических импульсов. Вероятно, что после всестороннего исследования удастся доказать возможность использования предложенной модели в качестве обобщающей модели сейсмических импульсов.

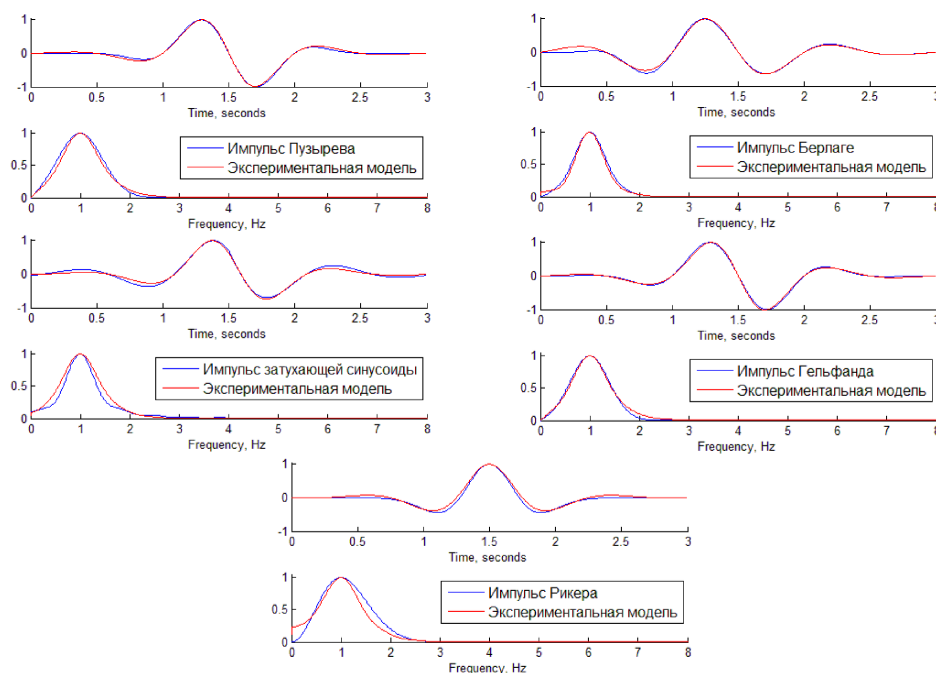


Рис. 2. Сравнение известных и предложенного сейсмических импульсов

4. Заключение

Используя экспериментальное моделирование и метод математической аналогии, была предложена и опробована модель сейсмического сигнала, возникающего при образовании трещин коллектора в результате ГРП. Модель может быть использована для сред с разным уровнем дисперсии волн. Модель является достаточно универсальной, так как хорошо приближает известные модели сейсмических импульсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинович Е.В., Туркин А.С., Новаковский Ю.Л. Наземная локация микросейсмических сигналов для мониторинга гидравлического разрыва пласта // Доклады ТУСУР, 2012. № 1(25). Ч. 1. С. 104–112.
2. Рабинович Е. В., Туркин А.С., Новаковский Ю.Л. Спектральная фильтрация сейсмических сигналов, возникающих при гидравлическом разрыве пласта. // Доклады ТУСУР, 2013. № 2(28). С. 175–179.
3. Рабинович Е.В., Вайнмастер П.И., Новаковский Ю.Л. Пространственная фильтрация сейсмических событий, возникающих при гидравлическом разрыве пласта. // Автоматика и программная инженерия, 2013. № 1(3). С. 53–60.
4. Рабинович Е.В., Вайнмастер П.И., Новаковский Ю.Л., Туркин А. С. Моделирование зоны трещиноватости, возникающей при гидравлическом разрыве пласта // Автометрия, 2014. № 4. С. 24–33.

5. Шнеерсон М.Б. Наземная невзрывная сейсморазведка. М.: Недра, 1988. 238 с.

THE MODEL OF THE SEISMIC PULSE ARISING AT HYDRAULIC FRACTURING

E.V. Rabinovich

Professor, Doctor of Technical Sciences, e-mail: erabinovich1952@gmail.com

K.S. Ganchin

Student, e-mail: k.lemmini@gmail.com

I.M. Pupyshev

Ph. D. (Math), e-mail: iluxa1@ngs.ru

G.S. Shefel

Ph. D. (Math), e-mail: ligr1x@yahoo.com

Novosibirsk State Technical University

Abstract. The results of experimental and theoretical research of the original seismic pulse model are presented. The under study seismic pulse is arising at formation of a fracture in the process of hydraulic fracturing. The comparison with known seismic wavelets is shown.

Keywords: seismic pulse model, hydraulic fracturing.

ФАКТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В.А. Шовин

аспирант, e-mail: v.shovin@mail.ru

Омский филиал Учреждения Российской академии наук Института математики
им. С.Л. Соболева Сибирского отделения РАН

Аннотация. Предлагается новый метод построения факторной модели на основе программной реализации нейронной сети и алгоритма обратного распространения ошибки. Этот метод является альтернативой классическому факторному анализу. В работе проведён численный эксперимент на статистических данных артериальной гипертензии.

Ключевые слова: артериальная гипертензия, факторный анализ, нейронные сети, алгоритм обратного распространения ошибки.

Классический факторный анализ [1] позволяет на базе выборок различных показателей сформировать факторные показатели, с необходимой точностью описывающие исходный объект и восстанавливающие исходные статистические данные. Факторные показатели являются линейной комбинацией исходных показателей (формула 1). Тем самым факторные модели носят линейный характер.

$$\vec{z}_i = a_{i1}\vec{p}_1 + a_{i2}\vec{p}_2 + \dots + a_{ig}\vec{p}_g + d_i\vec{u}_i \quad (1)$$

m — число переменных, g — число факторов, $\vec{z}_i$ — исходные переменные, $\vec{p}_i$ — общие факторы, $\vec{u}_i$ — специфичные факторы.

Нейронная сеть позволяет восстановить любую однозначную закономерность между исходными и целевыми показателями. При этом восстанавливаемые закономерности могут иметь нелинейный характер. Для восстановления закономерностей между параметрами используется специальный алгоритм обучения нейронной сети: алгоритм обратного распространения ошибки [2]. Этот алгоритм с математической точки зрения представляет собой градиентный метод оптимизации.

Суть нового метода для построений факторных моделей заключается в том, что для выявления закономерностей между параметрами используется математическая модель нейронной сети.

В данном методе построения факторной модели латентные характеристики ставятся в соответствие нейронам скрытого слоя. При этом число нейронов скрытого слоя полагают меньшим числа нейронов входного слоя для осуществления факторного сжатия входной информации. Для оценки числа нейронов

скрытого слоя можно применять критерий Гутмана классического факторного анализа. Нейронам входного и выходного слоя ставятся в соответствие исходные характеристики объектов исследования. Такая конфигурация нейронной сети соответствует классическому факторному анализу.

С помощью обучения нейронной сети вычисляются веса входных связей нейронов скрытого и выходного слоя, которые соответствуют элементам обратного и прямого факторного отображения. Веса нейронов ищутся в интервале $[-1, 1]$. Наполнение факторов исходными переменными определяется с помощью значений элементов факторного отображения и выбранного порогового уровня значимости.

Полученная линейная взаимосвязь переменных соответствует классической модели факторного анализа, в которой факторы являются линейными комбинациями исходных переменных (формулы 2, 3, 4). Задача поиска факторного отображения и значений факторов сводится к задаче поиска весов нейронной сети. Поскольку факторное отображение и значения факторов являются неизвестными, необходима сеть с промежуточным слоем. Сеть в целом осуществляет тождественное преобразование, т.е. выходной сигнал на i -ом нейроне входного слоя равен выходному сигналу i -го нейрона выходного слоя. Отдельные части сети (входная и выходная часть) соответствуют прямому и обратному факторному отображению.

$$p_j = \sigma \left(\sum_{i=1}^m w_{ij}^{(1,2)} z_i + t_j^{(2)} \right), \quad (2)$$

$$z'_j = \sigma \left(\sum_{i=1}^g w_{ij}^{(2,3)} p_i + t_j^{(3)} \right), \quad (3)$$

$$\sigma(x) = \frac{2}{1 + \exp(-x)} - 1, \quad (4)$$

z_i — исходные переменные, $w_{ij}^{(s,t)}$ — связь между i -ым нейроном s -го слоя и j -ым нейроном t -го слоя, $t_i^{(s)}$ — пороговый уровень i -го нейрона s -го слоя, p_i — выходное значение i -го нейрона скрытого слоя, z'_i — выходное значение i -го нейрона выходного слоя, $\sigma(x)$ — антисимметричная сигмоидальная передаточная функция.

Для получения интерпретабельного факторного отображения вводится дополнительное слагаемое в общую целевую функцию квадратов невязок (формула 5), соответствующее критерию «варимакс» классического факторного анализа, — это максимизация дисперсии нагрузок переменной, приходящихся на все факторы (формулы 6, 7).

$$E = \sum_{i=1}^m (z_i - z'_i)^2. \quad (5)$$

$$Dw_{ij}^{(2,3)} = \sum_{i=1}^g \left(w_{ij}^{(2,3)} - Ew_{ij}^{(2,3)} \right)^2 \rightarrow \max. \quad (6)$$

$$\frac{1}{D_i w_{ij}^{(2,3)}} \rightarrow \min. \quad (7)$$

Учет «варимакс» критерия приводит к появлению дополнительных слагаемых при изменении весов нейронной сети на выходном слое (формула 8, 9).

$$\Delta w_{ij}^{(2,3)} = -\gamma \frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{(2,3)}} = \gamma \frac{1}{\left(D_i w_{ij}^{(2,3)}\right)^2} \left(w_{ij}^{(2,3)} - E_i w_{ij}^{(2,3)}\right). \quad (8)$$

$$w_{ij}^{(2,3)} := w_{ij}^{(2,3)} + \Delta w_{ij}^{(2,3)}. \quad (9)$$

Аналогичный учёт главных условий факторного анализа на сумму квадратов факторных нагрузок переменной, приходящихся на все факторы, меньшей 1 (формула 10) и поиск факторных нагрузок в интервале $[-1, 1]$ (формула 11) приводит к поправкам на изменение весов нейронной сети в методе обратного распространения ошибки для выходного слоя (формула 12, 13).

$$\sum_{i=1}^g \left(w_{ij}^{(2,3)}\right)^2 \leq 1. \quad (10)$$

$$w_{ij}^{(2,3)} \in [-1, 1]. \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^g \left(w_{ij}^{(2,3)}\right)^2 \rightarrow \min. \quad (12)$$

$$\Delta w_{ij}^{(2,3)} = -\lambda \frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{(2,3)}} = -\lambda 2w_{ij}^{(2,3)}. \quad (13)$$

Предложен альтернативный метод построения факторной модели на основе нейронной сети и алгоритма обратного распространения ошибки. Преимущества данного метода заключается в том, что он объединяет в себе все этапы классического факторного анализа: поиск факторного отображения и значений факторов. Этот метод осуществляет косоугольный факторный анализ, тем самым имеет максимальную степень общности для линейной модели.

В ходе численного эксперимента с данными артериальной гипертензии было установлено, что хорошая обучаемость нейронной сети достигается при числе нейронов в скрытом слое не меньшем верхней границы числа собственных значений исходных переменных по критерию Гутмана. При меньшем числе нейронов в скрытом слое наблюдались значительные ошибки на обучающей выборке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иберла К. Факторный анализ / Пер. с нем. В.М. Ивановой; Предисл. А.М. Дуброва. М.: Статистика, 1980.
2. Хайкин С. Нейронные сети: Полный курс / Пер. с англ. Н.Н. Куссуль, А.Ю. Шелестова. 2-е изд., испр. М.: Издательский дом Вильямс, 2008. 1103 с.

FACTOR MODELING BASED ON NEURAL NETWORK

V.A. Shovin

Postgraduate Student, e-mail: v.shovin@mail.ru

Omsk Branch of Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Omsk

Abstract. A new method of factor model constructing based on the software implementation of neural network and backpropagation algorithm is offered. This technique is an alternative to the classical factor analysis. In this paper the numerical experiment on statistics of hypertension is conducted.

Keywords: factor analysis, neural networks, backpropagation algorithm, hypertension.

COGNITIVE MODELLING APPLICATION FOR SOCIAL TENSION STUDY

Valentina A. Marenko¹

Senior Reseacher, Associate Professor, Ph.D. (Eng.), e-mail: marenko@ofim.oscsbras.ru

Oleg N. Luchko²

PhD(Ped.), Professor, e-mail: o_luchko@rambler.ru

¹Sobolev Institute of Mathematics, Omsk, Russia

²Omsk State Institute of Service, Omsk, Russia

Abstract. This article describes the construction of a cognitive map for the problem domain of the social tensions. Simulation experiments are conducted. Dining solutions obtained.

Keywords: model, cognitive approach, cognitive dissonance, graph, vertices, arcs, simulation experiment.

1. Introduction

Society is a social system. It can be in a steady state, if the social expectations of individuals correspond to reality. Social tensions arise otherwise. It is reflected in the mood, judgment and behavior of individuals. Social tension is concerned with insecurity, aggression and other negative reactions. Social tensions experienced individuals who can not adapt to social changes due to high prices and low incomes, fear of losing their jobs due to the inability to change the current picture of the world. Such individuals experience cognitive dissonance. Cognitive dissonance is the state of a potential participant of social conflicts.

The purpose of the paper is the fixation and analysis of cognitive dissonance, the study of its causes and manifestations.

2. Methodology

The task of the research conducted is the multifaceted study of cognitive dissonance with the cognitive approach application. The cognitive approach includes cognitive information structuring using graph theory, the construction of the cognitive matrix in linear algebra, carrying out simulation experiments to find significant controlling factors. Scientists all over the world are making a great contribution to the development of models of unstable social processes.

Perov E.V. used cognitive approach to the study of social tensions of society. He made up the circuit in the form of a cognitive map, which identifies factors gain of conflicts of society. The cognitive map is applied to determine the cause of social tension strengthening [1].

Belyaeva N.A. offered the method for social tensions measuring by income differentiation. [2].

Radko K.S., Ivanova M.I., Moshchenko I.N. conducted the factor analysis of the social tensions of society. They made up the images of emotional attitudes towards the existing political order. The semantic differential method was used for the processing of empirical information [3].

Proshin E.N., Zhuravleva N.A., Martynov V.V. created an information model for the description of social tension. They made up a mathematical model for social tensions calculation [4].

Dolomatov M.U. and other researchers have created an information system Assessment of the level of social tension. They offered two models. One model describes the distribution of income. The second model calculates a comprehensive assessment of social tensions based on the entropy approach [5].

Orlik L.K. constructed a predictive model. Empirical studies and a mathematical model are used to predict the probability of aggression among students [6].

Abramovich E.S. and Gryzlov I.N. used mathematical statistics to measure social tension [7, 8].

Shvedovskii V.A. developed mathematical model-building groups with the use of differential equations. Population groups are divided into supporters and opponents. The model describes the dynamic behavior of groups. He built the system of Makrosotsium and defined the oscillation period of socio-political tensions in the Caucasus with its help [9].

García-Barrios L.E., Speelman E.N., Pimm M.S. developed a simulation system to generate options for the development of the object, which would suit the conflicting parties [10].

Juska A., Woolfson C. dedicated their work to clarification of the structure and causes of social conflicts in the specific examples [11, 12]. M. Lobo analyzed the causes of conflicts between ethnic groups [13]. Professional aspects of social tensions highlighted Kepplinger H.M. [14]. Aggressiveness is investigated in the work of C. Nathan De Wall, Craig A. Anderson, Brad J. Bushman [15] and others.

2.1. Self-esteem and aggressive mood

Human activity has been studied with the help of the computer metaphor of the brain. This approach is currently inadequate. It is necessary to study mood and other people's emotions [16].

We applied the cognitive approach. It allows you to intensify the process of knowledge, understanding and explaining the information. We make extensive use of schematization. Schematization — these are different ways of individuals considerations about possible cause-and-effect relationships between the objects of the problem area. The conclusion is based on limited information in this case [17].

A person has self-esteem, his own attitude to communication, behavior, activities, experiences. It is influenced by the estimation of the society. Self-esteem may be optimal and non-optimal. We conducted experiments to determine the self-esteem of students of the university. Low self-esteem has 30-40 points. Average

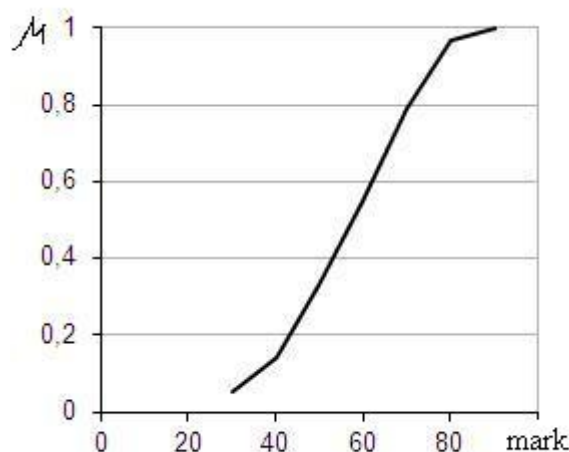


Figure 1. Fuzzy set of self-esteem

self-esteem has 50-60 points. High self-esteem has 70-90 points. Fuzzy set of self-esteem is shown in Figure 1. It shows the degree of property by points.

In the experiment conducted the students were offered statements. The responses showed their propensity for conflict or compromise in conflict situations. Responses were divided into three groups. The first group was choosing a compromise in conflict situations. The second group had an interim choice. The third group was choosing conflict in any situation. We used the correlation coefficient to characterize the relationship between self-esteem and aggressive mood. The correlation coefficient had the value of minus 0.18 (weak feedback). The analysis showed that 11% of students with high self-esteem, and 4% — the average self-esteem, and 3% — low self-esteem, tend to conflict. Half of the students chose a compromise in one case, and in another one — a conflict, regardless of self-esteem. High self-esteem may be the cause of aggressive mood. High self-esteem destroys self-government, self-control and idealizes one's own image.

Aggressive mood of a person has destructive and constructive direction. The constructive direction vector is oriented against processes of the entropy.

2.2. The example of entropic processes in society

The causes of social tension are: unemployment, poor quality of life, low incomes, the inability to get a good education and good health care, as well as an increase in crime. We examined the information on the growth of crime in the regions of the Russian Federation and the country as a whole. The data are available on the website of the Federal State Statistics Service.

Violation of the law is a socially dangerous act. It is contrary to the rule of law. Crime can be regarded as a subsystem with the position of system analysis. Subsystem has a behavior and can change the state. The behavior is a function of the subsystem:

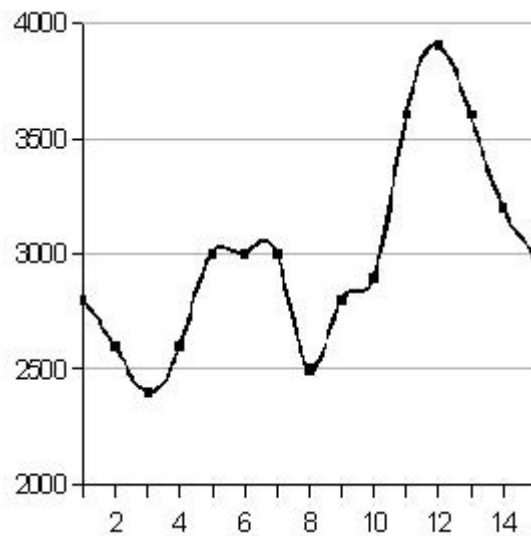


Figure 2. The number of registered crimes

$$c(t) = [c(t-1), y(t), x(t)],$$

$c(t)$ — the state of the subsystem at the moment of the time t , $y(t)$ — control actions, $x(t)$ — disturbing influences.

In our research work the behavior of the subsystem is defined by the values of recorded crimes (Fig. 2). The numbers on the x-axis correspond to the time interval from 1995 to 2009. Number 1 — 1995. Number 2 — 1996. And etc. The numbers of reported crimes are on the y-axis.

Discussion. The behavior of the subsystem has cyclical nature. System laws can not be undone. They can not be prohibited. Any system must be managed in accordance with the laws of the system to produce a positive decision. The cyclical nature should be used for the successful management. During the periods of crime recession it is necessary to accumulate the resources for effective decision in the growth.

The properties of multidimensional systems are difficult to investigate. They have a large number of variables. The scientists have used the method of reduction for simplification. A large number of differential equations is reduced to a smaller number. Reduced system of equations is called the base system. It contains two equations for the variables x and y :

$$dx/dt = A \cdot P(x, y); dx/dt = B \cdot Q(x, y),$$

A and B — coefficients; $P(x, y)$ and $Q(x, y)$ — non-linear functions. This method is the method of the phase portrait construction.

The baseline data are presented as a table. The values in the cells of the table show the number of crimes according to years and species. They are on the website of the Federal State Statistics Service [18].

Table 1. Number of reported crimes in the Russian Federation (in thousands)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1990	15,6	14	15	83,3	16,5	913,1	16,3	96,3
...								
2009								

The first column shows the number of murders and attempted murders. The second column shows the intentional infliction of harm. The third one is abuse or attempt to abuse. The fourth one is robbery. The fifth one — brigandage, the sixth — theft, the seventh — crimes connected with unlawful narcotic circulation, the eighth — breaking of traffic rules and transportation exploitation.

The values are non-linear functions in the cells of the table. They are used for charting. The subsystem of crime is divided into three groups according to the years: 1990-1995; 1995-2000; 2000-2005 (Fig. 3, 4, 5).

Discussion. The markers indicate the status of the crimes subsystem at different times in the graphs. The data on crimes increase were plotted on the y-axis. The number of crimes is plotted along the x-axis in the normalized form. Markers are numbered in accordance with the types of crimes on the charts (Table). What do you see on the charts? The crimes subsystem varies. The distance between the markers either increases or decreases. The markers fill charts occasionally. We limit some area. The convex curve surrounds the markers (Fig. 5). The entropy $S(t)$ can be determined by Ya. Sinaya's formula [19]:

$$S(t) = k \cdot \ln(G(t)/G_0),$$

k — Boltzmann constant, G_0 — the unit cell of the phase space.

Each time the interval coincides with the crimes subsystem state. Three states of the crimes subsystem are shown in fig. 3, 4, 5. The markers are closer or farther apart. Ongoing processes correspond to an increase or decrease of entropy in the subsystem of the crime.

Crime rates comparison. We have compared the crime rates in the Russian Federation as a whole and in the region of the Omsk region. The lines are marked in accordance with the normalized data on crimes in the Russian Federation. The dotted lines are marked in reference to the normalized data on crimes in the Omsk region (Fig. 6). We studied the periods from 1995-1998 to 2007-2010 (4 years correspond to 4-axis in Fig. 6).

Crime has become lower in the Omsk region in 2007-2010. Its normalized values are smaller than in the Russian Federation as a whole.

Discussion. Disorder is the system regularity of closed systems. The law enforcement system needs to restore order. The entropy of closed systems can not decrease. The system openness is one of the factors of entropy decrease. The system can increase the degree of its organization and reduce the entropy by entropy transmission into the environment.

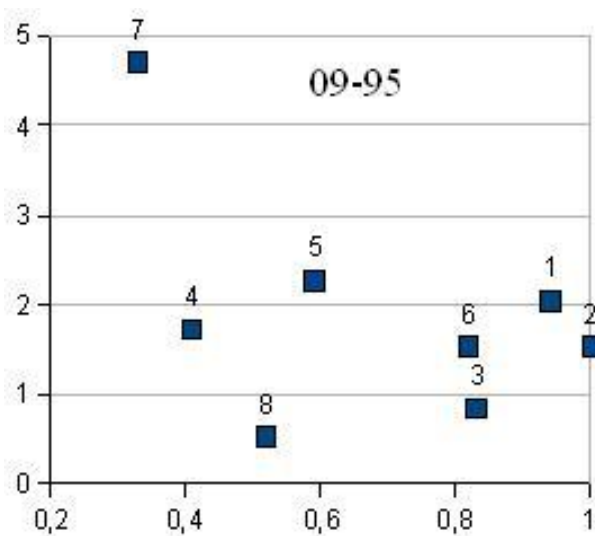


Figure 3.

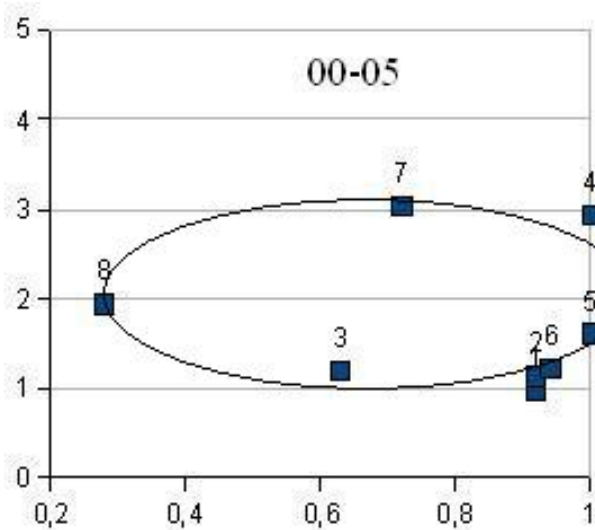


Figure 4.

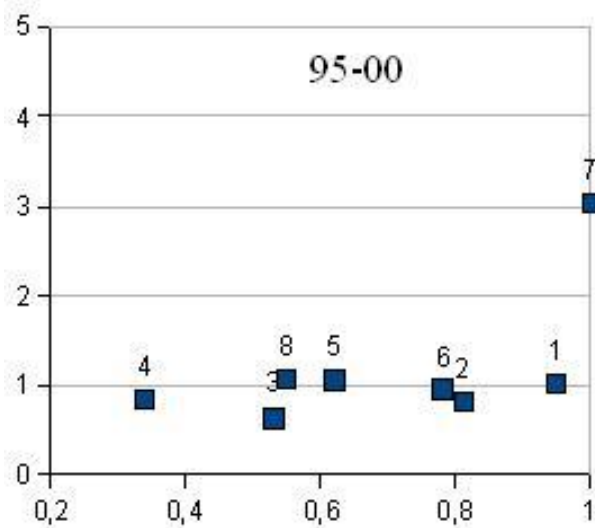


Figure 5.

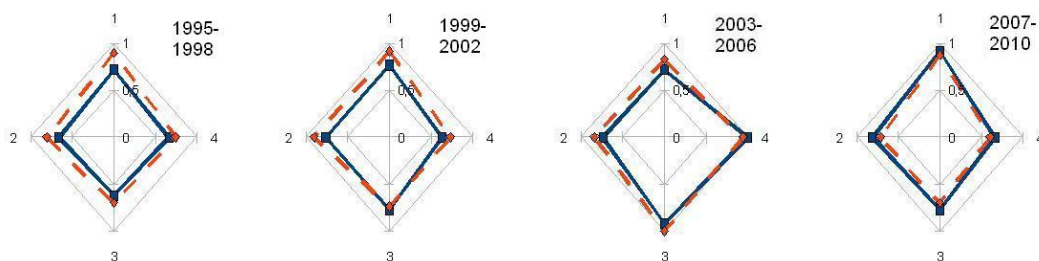


Figure 6. The number of reported crimes during the 4-years period
(Line — Russian Federation, dotted — Omsk region)

We can operate the system in accordance with the objective laws and to have positive results. We must learn to control the amplitude and frequency of entropy oscillation to ensure the stability of the system [20].

2.3. The study of cognitive personality dissonance

Cognitive dissonance is an unpleasant mood. Unmet needs are reasons for such situations. To satisfy needs fully is impossible. There is a barrier of discontent, after which there is an explosion. We want to find the measure of discontent, or the amount of cognitive dissonance.

The construction of a cognitive map. We applied schematization and constructed cognitive maps to identify new points of view concerning the problem. We analyze cognitive schemes of our own and others' to improve the decisions. Every person has a set of mental models. He uses it to analyze the causes and solutions variants.

Discussion. The first researcher chose the mood as the target factor. Mood and health are two interrelated concepts. If health is poor, the mood is bad (direct relationship). The mood can be improved by the high quality of medical services or entertainments (inverse relationship). Both ways require good incomes (direct relationship). Good incomes can improve mood (direct dependence) (Fig. 7).

The second researcher chose the degree of cognitive dissonance as a target factor. Establishing of relationships leads to the construction of a cognitive map 2 (Fig. 8).

If the health of the individual is bad, then the degree of cognitive dissonance will be high (inverse relationship). He is seeking to reduce its level. He addresses a medical or entertainment institution. The degree of cognitive dissonance will be high, it means that medical services or entertainments are necessary (direct dependence) (Fig. 8). These means require good incomes. High incomes help to reduce the degree of cognitive dissonance (inverse relationship). The quality of medical service is high, the health is better (direct relationship). The better the health the more success at work (direct relationship).

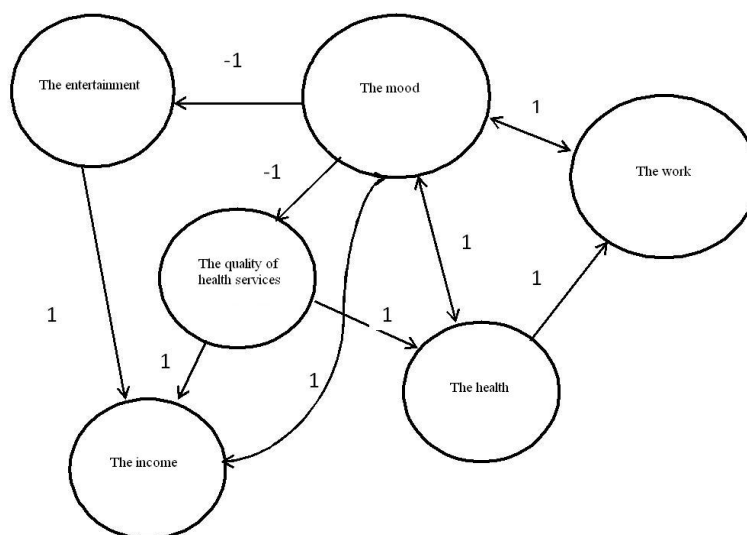


Figure 7. Cognitive map 1 "Mood depends on various factors"

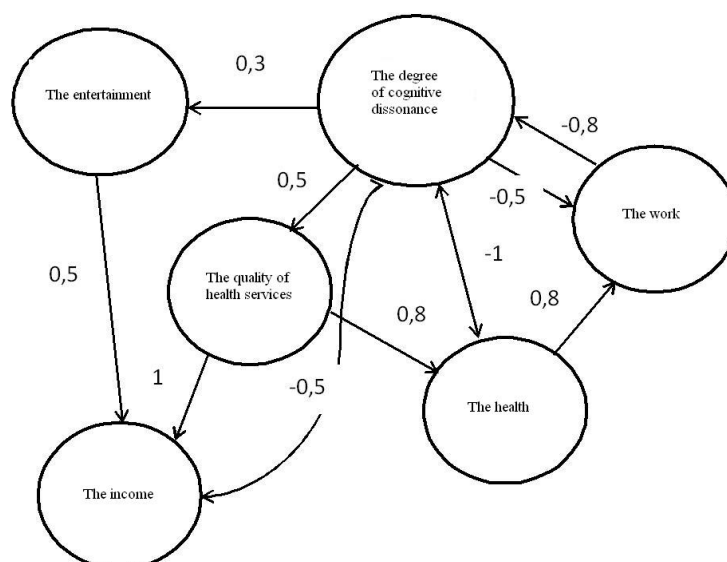


Figure 8. Cognitive map 2 "Cognitive dissonance depends on various factors"

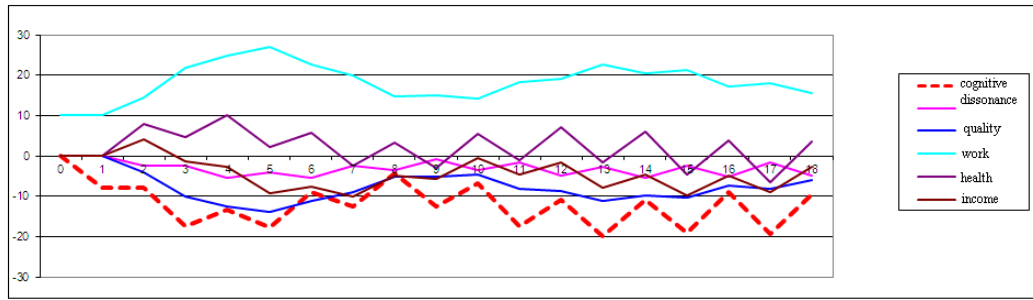


Figure 9. The dotted line is the degree of cognitive dissonance when increasing the factor of work by 10 conventional units

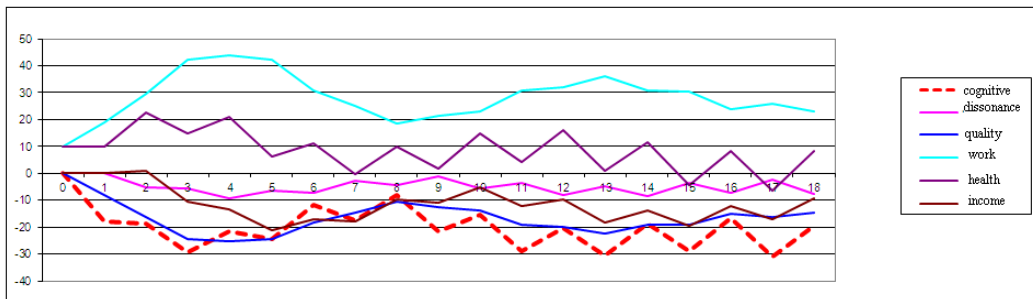


Figure 10. The dotted line is the degree of cognitive dissonance when increasing the factors of work and health by 10 conventional units

2.4. Discussion of research

We have two cognitive maps. The mood concepts and degree of cognitive dissonance can not be interchangeable because they have different relationships with other concepts. Let us compare the mood and the degree of cognitive personality dissonance. The mood is better, the degree of cognitive dissonance is lower (inverse relationship).

Simulation experiments were performed using the procedure [21, 22, 23]. We have developed a software tool [24, 25]. We used the actions:

- construction and transposition of cognitive matrix;
- perturbations were introduced in the nodes a of the graph;
- disturbance was introduced on the ways of graph.

Change in the control factors. Figures 9 and 10 show the change in the target and control factors on 18 steps. Work factor was increased by 10 conventional units. The factor degree of cognitive dissonance (dotted line) reaches 20 conventional units in this case. The minus sign indicates an inversely proportional relationship between the factors.

The results of simulation experiments are presented on 18 steps with an increase in factors of work and health by 10 conventional units given on the fig. 10. The factor degree of cognitive dissonance has 30 conventional units. These results are consistent with common sense: the better the work and health, the lower the

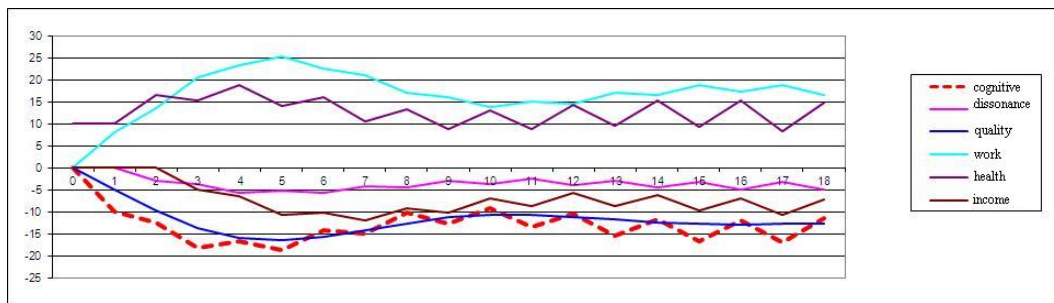


Figure 11. Dotted cognitive dissonance is about 20 conventional units. (The relationship of quality of medical services and health are constant, equal to 0.8); the relationship of health and quality of medical services is -0.5 (weight of the arc)

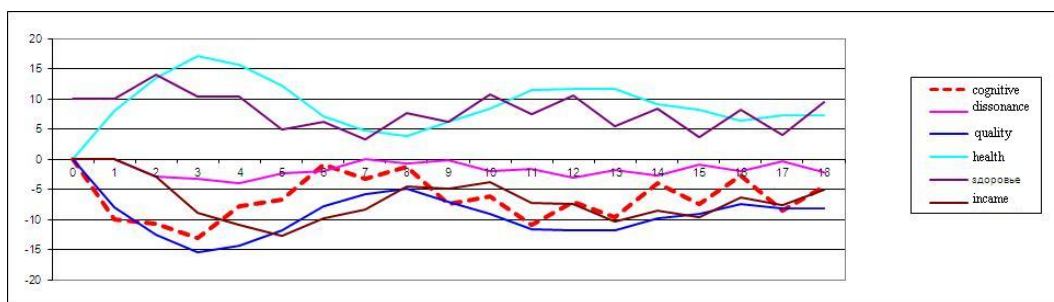


Figure 12. Dotted cognitive dissonance is about -1 of conventional units. (The relationship of quality of medical services and health are constant, equal to 0.8); the relationship of health and quality of medical services is -0.8 (weight of the arc)

degree of cognitive dissonance.

Changing the values of relationships. The results of simulation experiments are shown in Figures 11, 12. The relationship between factors of health and quality of medical services are not constant. (The relationship of quality of medical services and health are constant, equal to 0.8). The relationship of health and quality of medical services is -0.5 (weight of the arc).

The degree of cognitive dissonance increases, if the relationship between the factors of health and quality of medical services are reduced.

Conclusion

Cognitive approach allows to conduct the following research work:

- Various factors are analyzed and the relationships are analyzed too;
- Consequences have no single cause, and the reasons have the nonlinear structure;
- A new view point concerning the problem;
- The stability of the system could be researched on the basis of consonance and dissonance characteristics.

REFERENCES

1. Perov Ye.V. Kognitivnoye modelirovaniye konfliktogennosti obshchestva / KHII vserossiyskoye soveshchaniye po problemam upravleniya. VSPU–2014. Moskva 16–19 iyunya 2014. M.: VSPU. P. 6243–6250.
2. Belyayeva L.A. Kul'turnyy i sotsial'nyy kapital i napryazhennost' sotsial'nogo prostanstva Rossii // ONS: obshchestvennyye nauki i sovremennost'. 2013. N. 5. P. 51–64.
3. Rad'ko K.S., Ivanova M.I., Moshchenko I.N. Nekotoryye trendy politicheskoy napryazhennosti sredi naseleniya Rostovskoy oblasti na konets 2011 goda // Elektronnyy zhurnal Inzhenernyy vestnik Dona. 2014. N. 3.
4. Proshin Ye.N., Zhuravleva N.A., Martynov V.V. Informatsionnaya model' otsenki i prognozirovaniya urovnya sotsial'noy napryazhennosti // Perspektivy razvitiya informatsionnykh tekhnologiy. 2013. N. 16. P. 76–81.
5. Dolomatov M.Yu., Zhuravleva N.A., Zakiyeva Ye.Sh., Proshin Ye.N. Proyektirovaniye sistemy otsenki urovnya sotsial'noy napryazhennosti // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. N. 2. P. 9.
6. Orlik L.K., Lazareva N.M. Prognosticheskaya model' sotsial'noy napryazhennosti v studencheskoy srede // Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo sotsial'nogo universiteta. 2013. T. 2, N. 5(120). P. 51–57.
7. Abramovich Ye.S. Matematiko-statisticheskiye metody analiza sotsial'noy napryazhennosti v rossiyskom obshchestve // Uchet i statistika. 2012. T. 1, N. 25. P. 85–89.
8. Gryzlov I.N. Metodika kratkosrochnogo prognozirovaniya indeksa protestnoy aktivnosti naseleniya regiona na osnove ispol'zovaniya statisticheskoy informatsii // Informatsionnyye sistemy i tekhnologii. 2013. N. 3(77). P. 54–60.
9. Shvedovskiy V.A., Petrova M.A. Matematicheskoye modelirovaniye dinamiki napryazhennosti etno-politicheskogo konflikta // Sotsiologiya: metodologiya, metody, matematicheskoye modelirovaniye. 2001. N. 14. P. 151–175.
10. García-Barrios L.E., Speelman E.N., Pimm M.S. An educational simulation tool for negotiating sustainable natural resource management strategies among stakeholders with conflicting interests // Ecological Modelling. 2008. 210(1-2). P. 115–126.
11. Juska A., Woolfson C. Policing political protest in Lithuania // Crime, Law and Social Change. May 2012. Volume 57, Issue 4. P. 403–424.
12. Hendrix C.S., Salehyan I. Climate change, rainfall, and social conflict in Africa // Journal of Peace Research. 2012. Vol. 49, Issue 1. P. 35–50.
13. Lobo M. Interethnic understanding and belonging in suburban Melbourne // Urban Policy and Research. 2010. 28(1). P. 85–99.
14. Kepplinger H.M. Publizistische Konflikte und Skandale. Gesellschaftliche Bedingungen politisch motivierter Gewalt. 2009. P. 93–117.
15. De Wall C.N., Anderson C.A., Bushman B.J. The General Aggression Model: Theoretical Extensions to Violence // Psychology of Violence. 2011. Vol. 1, N. 3. P. 245–258.
16. Chernigovskaya T.V. YAzyk, mozg i komp'yuternaya metafora // Chelovek. 2007. N. 2. P. 63–75.
17. Plotnitskiy Yu.M. Modeli sotsial'nykh protsessov: uchebn.posob. dlya vuzov. M.: LOGOS, 2001. 296 p.
18. Rossiyskiy statisticheskiy yezhegodnik. URL: <http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat/rosstatsite/main/publishing/catalog/>

statisticCollections/doc_1135087342078.

19. Chernyavskiy D.S. Sinergetika i informatsiya: dinamicheskaya teoriya informatsii. M.: Nauka, 2001. 244 p.
20. Prangishvili I.V. Entropiynnye i drugiye sistemnyye zakonomernosti: Voprosy upravleniya slozhnymi sistemami / In-t problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova. M.: Nauka, 2003. 428 p.
21. Diamanti O.V., Marenko V.A., Luchko O.N. Primeneniye kognitivnykh tekhnologiy dlya upravleniya v sotsial'noy sfere // Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika. 2014. N. 3. P. 58–63.
22. Marenko V.A., Luchko O.N., Lupentsov O.S. Razrabotka modeli upravleniya protsessom obucheniya s ispol'zovaniyem kognitivnykh tekhnologiy // Informatika i yeyo primeneniya. 2014. T. 8, Vyp. 1. P. 99–105.
23. Kulinich A.A. Verifikatsiya kognitivnykh kart na osnove obyasneniya prognozov // Upravleniye bol'shimi sistemami. Spetsial'nyy vypusk 30.1. «Setevyye modeli v upravlenii». 2010. P. 453–469.
24. Luchko O.N., Marenko V.A., Lupentsov O.S. Programmnaya sistema dlya izucheniya effektivnosti obrazovatel'nogo protsessa v vuze s ispol'zovaniyem kognitivnykh tekhnologiy / Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM N. 2013661212 ot 02.12.2013 g.
25. Vasilenko T. URL: <http://www.timur0.nm.ru/>.

ПРИЛОЖЕНИЯ КОГНИТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СОЦИАЛЬНОЙ НАПРЯЖЁННОСТИ

В.А. Маренко¹

старший научный сотрудник, к.т.н., доцент, e-mail: marenko@ofim.oscsbras.ru

О.Н. Лучко²

к.п.н., профессор, e-mail: o_luchko@rambler.ru

¹Институт математики им. С.Л. Соболева, Омск, Россия

²Омский государственный институт сервиса, Омск, Россия

Аннотация. Эта статья описывает построение когнитивной карты для задачи изучения социальной напряжённости. Проведён компьютерный эксперимент. Получено решение.

Ключевые слова: модель, когнитивный подход, когнитивный диссонанс, граф, вершины, дуги, компьютерное моделирование.

GRANULARITY EXPLAINS EMPIRICAL FACTOR-OF-THREE RELATION BETWEEN PROBABILITIES OF PULMONARY EMBOLISM IN DIFFERENT PATIENT CATEGORIES

Beverly Rivera¹

Research Assistant, PhD student, e-mail: barivera@miners.utep.edu

F. Zapata²

Research Assistant Professor, Ph.D. (Computer Science), e-mail: fazg74@gmail.com

V. Kreinovich¹

Ph.D. (Math.), Professor, e-mail: vladik@utep.edu

¹University of Texas at El Paso, El Paso, TX 79968, USA

²Research Institute for Manufacturing and Engineering Systems (RIMES), USA

Abstract. Pulmonary embolism is a very dangerous difficult-to-detect medical condition. To diagnose pulmonary embolism, medical practitioners combine indirect signs of this condition into a single score, and then classify patients into low-probability, intermediate-probability, and high-probability categories. Empirical analysis shows that, when we move from each category to the next one, the probability of pulmonary embolism increases by a factor of three. In this paper, we provide a theoretical explanation for this empirical relation between probabilities.

Keywords: pulmonary embolism, granularity, factor-of-three relation, low-probability category, intermediate-probability category, high-probability category.

1. Formulation of the Problem

Pulmonary embolism: a brief reminder. One of the most dangerous medical conditions is *pulmonary embolism*, a blockage of the main artery of the lung (or one of its branches) which can lead to collapse and sudden death; see, e.g. [1]. Pulmonary embolism is responsible for about 15% of sudden deaths.

If detected on time, pulmonary embolism can be treated: either by anticoagulation medicine like heparin or warfarin, or — in severe cases — by a surgery. The problem is that pulmonary embolism is difficult to diagnose: lungs are mostly normal, fever is either absent or low-grade, etc.

Scores: a brief description. Since pulmonary embolism is difficult to directly diagnose, hospitals' emergency departments take into account different variables like age, heart rate, different types of pain, etc., to produce a numerical score.

A high score indicates a high probability of pulmonary embolism; so, the doctors start applying aggressive treatment to such patients.

One of the most widely used ways to assign scores is known as the *Geneva score*; its latest version is described by [4]. Depending on this score, patients are classified into three categories:

- patients with low scores are classified into the *low-probability* category;
- patients with intermediate scores are classified into the *intermediate-probability* category; and
- patients with high scores are classified into the *high-probability* category.

Scores: empirical fact. According to an empirical study [4]:

- in the low-probability category, approximately 8% of the patients had pulmonary embolism;
- in the intermediate-probability category, approximately 28% of the patients had pulmonary embolism; and
- in the high-probability category, approximately 74% of the patients had pulmonary embolism.

From each category to the next one, the probability increases by a factor of three.

What we do in this paper. Division into categories is a particular case of *granularity*; see, e.g., [5]. In this paper, following ideas from [2, 3], we use granularity techniques to provide a theoretical explanation for the above empirical relation between probabilities.

2. Explanation

Main idea. We are interested in the situation where we estimate probability — a quantity which can only take non-negative values. In general, to estimate the values of a non-negative quantity, we select a sequence of positive numbers

$$\dots < e_0 < e_1 < e_2 < \dots$$

(e.g., 0.1, 0.3, 1.0, etc.), and every actual value x of the estimated quantity is then estimated by one of these numbers. Each estimate is approximate: when the estimate is equal to e_i , the actual value x of the estimated quantity may differ from e_i ; in other words, there may be an estimation error $\Delta x = e_i - x \neq 0$.

What is the probability distribution of this estimation error? This error is caused by many different factors. It is known that under certain reasonable conditions, an error caused by many different factors is distributed according to Gaussian (normal) distribution (see, e.g., [7]; this fact — called *central limit theorem* —

is one of the reasons for the widespread use of Gaussian distribution in science and engineering applications). It is therefore reasonable to assume that Δx is normally distributed.

It is known that a normal distribution is uniquely determined by its two parameters: its average a and its standard deviation σ . Let us denote the average of the error Δx by Δe_i , and its standard deviation by σ_i . Thus, when the estimate is e_i , the actual value $x = e_i - \Delta x$ is distributed according to Gaussian distribution, with an average $e_i - \Delta e_i$ (which we will denote by $\tilde{e}_i$), and the standard deviation σ_i .

For a Gaussian distribution with given a and σ , the probability density is everywhere positive, so theoretically, we can have values which are as far away from the average a as possible. In practice, however, the probabilities of large deviations from a are so small that the possibility of such deviations can be safely ignored. For example, it is known that the probability of having the value outside the “three sigma” interval $[a - 3\sigma, a + 3\sigma]$ is $\approx 0.1\%$ and therefore, in most applications to science and engineering, it is assumed that values outside this interval are impossible.

There are some applications where we cannot make this assumption. For example, in designing computer chips, when we have millions of elements on the chip, allowing 0.1% of these elements to malfunction would mean that at any given time, thousands of elements malfunction and thus, the chip would malfunction as well. For such critical applications, we want the probability of deviation to be much smaller than 0.1%, e.g., $\leq 10^{-8}$. Such small probabilities (which practically exclude any possibility of an error) can be guaranteed if we use a “six sigma” interval $[a - 6\sigma, a + 6\sigma]$. For this interval, the probability for a normally distributed variable to be outside it is indeed $\approx 10^{-8}$.

Within this Gaussian description, what is the optimal granularity?

Optimal granularity: informal explanation. In accordance with the above idea, for each e_i , if the actual value x is within the “three sigma” range

$$I_i = [\tilde{e}_i - 3\sigma_i, \tilde{e}_i + 3\sigma_i],$$

then it is reasonable to take e_i as the corresponding estimate.

We want a granulation which would cover all possible values, so each positive real number must be covered by one of these intervals. In other words, we want the union of all these intervals to coincide with the set of all positive real numbers.

We also want to make sure that all values that we are covering are indeed non-negative, i.e., that for every i , even the extended “six sigma” interval

$$[\tilde{e}_i - 6\sigma_i, \tilde{e}_i + 6\sigma_i]$$

only contains non-negative values.

One of the main purposes of granularity is to decrease the number of “labels” that we use to describe different quantities. So, we want to consider optimal (minimal) sets of intervals. Formally, we can interpret “minimal” in the sense

that whichever finite subset we pick, we cannot enlarge their overall coverage by modifying one or several of these intervals. Let us formalize these ideas.

Optimal granularity: formal description. In the following definitions, we will use the fact that an arbitrary interval $[a^-, a^+]$ can be represented in the Gaussian-type form $[a - 3\sigma, a + 3\sigma]$: it is sufficient to take $a = (a^- + a^+)/2$ and $\sigma = (a^+ - a^-)/6$.

Definition.

- We say that an interval $I = [a - 3\sigma, a + 3\sigma]$ is reliably non-negative if every real number from the interval $[a - 6\sigma, a + 6\sigma]$ is non-negative.
- A set $\{I_i\}$, $i = 1, 2, \dots$, of reliably non-negative intervals I_i is called a granulation if every positive real number belongs to one of the intervals I_i .
- We say that a granulation can be improved if, for some finite set $\{i_1, \dots, i_k\}$, we can replace intervals I_{i_j} with some other intervals I'_{i_j} for which

$$\bigcup_{j=1}^k I_{i_j} \subset \bigcup_{j=1}^k I'_{i_j} \quad \bigcup_{j=1}^k I_{i_j} \neq \bigcup_{j=1}^k I'_{i_j},$$

and still get a granulation.

- A granulation is called optimal if it cannot be improved.

Proposition. In an optimal granulation, $I_i = [a_i, a_{i+1}]$, where $a_{i+1} = 3a_i$.

This explains the fact that each next probability is three times larger than the previous one.

Proof.

1°. Let us first prove that for every interval $I_i = [a_i - 3\sigma_i, a_i + 3\sigma_i]$ from an optimal granulation, $a_i = 6\sigma_i$.

Indeed, since all the intervals I_i must be reliably non-negative, we can conclude that $a_i - 6\sigma_i \geq 0$, hence $a_i \geq 6\sigma_i$. So, to complete this part of the proof, it is sufficient to show that we cannot have $a_i > 6\sigma_i$. We will prove this by showing that if $a_i > 6\sigma_i$, then the corresponding granulation can be improved.

Indeed, in this case, we can take $\sigma'_i = a_i/6 > \sigma_i$, and consider a wider interval $I'_i = [a_i - 3\sigma'_i, a_i + 3\sigma'_i] \supset I_i$. Due to our choice of σ'_i , this new interval is also reliably non-negative. Therefore, if we replace the interval I_i by I'_i , we still get a granulation, and $I_i \subset I'_i$, $I_i \neq I'_i$. Thus, the original granulation can be improved.

So, if the granulation is optimal (i.e., cannot be improved), we have $a_i = 6\sigma_i$.

2°. Let us now prove that for every interval $I_i = [a_i^-, a_i^+]$ from an optimal granulation, $a_i^+ = 3a_i^-$.

Indeed, from Part 1 of this proof, we can conclude that for an arbitrary interval $I_i = [a_i^-, a_i^+] = [a_i - 3\sigma_i, a_i + 3\sigma_i]$ from the optimal granulation, we have $3\sigma_i = 0.5 \cdot a_i$, hence $a_i^- = a_i - 3\sigma_i = 0.5 \cdot a_i$ and $a_i^+ = a_i + 3\sigma_i = 1.5 \cdot a_i$. Thus, $a_i^+ = 3a_i^-$.

3°. Let us now show that if two intervals from an optimal granulation intersect, then this intersection can only consist of a single point.

To prove this, we will show that if two intervals $I_i = [a_i^-, a_i^+]$ and $I_j = [a_j^-, a_j^+]$ have a more extensive intersection, then the granulation can be improved. Without losing generality, we can assume that $a_i^- \leq a_j^-$.

We already know that since both I_i and I_j are intervals from an optimal granulation, we have $a_i^+ = 3a_i^-$ and $a_j^+ = 3a_j^-$. Since $a_i^- \leq a_j^-$, we thus conclude that $a_i^+ = 3a_i^- \leq 3a_j^- = a_j^+$.

The fact that the intervals $I_i = [a_i^-, 3a_i^-]$ and $I_j = [a_j^-, 3a_j^-]$ have an intersection means that $a_j^- \leq 3a_i^-$; the fact that this intersection is not simply a single point means that $a_j^- < 3a_i^-$. In this case, $I_i \cup I_j = [a_i^-, 3a_j^-]$.

Let us show that we can improve the granulation if we replace I_i by itself $I'_i = I_i$ and I_j by $I'_j = [3a_i^-, 9a_i^-]$. Indeed, both new intervals are reliably non-negative, and the new union $I'_i \cup I'_j = [a_i^-, 9a_i^-]$ is a strict superset of the old one — because $a_j^- < 3a_i^-$ hence $3a_j^- < 9a_i^-$.

4°. So, in an optimal granulation, every interval must be of the type $[a, 3a]$, these intervals must cover the entire real axis, and they cannot intersect in more than one point. Thus, right after each interval $[a_i, 3a_i]$, there should be the next interval $[a_{i+1}, 3a_{i+1}]$, so we should have $a_{i+1} = 3a_i$.

Thus, we get the description from the formulation of the theorem.

5°. One can also easily prove that the granulation in which $I_i = [a_i, a_{i+1}]$ with $a_{i+1} = 3a_i$ cannot be improved and is thus optimal. The proposition is proven.

Acknowledgments

This work was supported in part by the National Science Foundation grants HRD-0734825 and HRD-1242122 (Cyber-ShARE Center of Excellence) and DUE-0926721.

REFERENCES

1. Goldhaber S.Z. Pulmonary thromboembolism // Kasper D.L., Braunwald E., Fauci A.S., Hauser S.L., Longo D., Jameson J.L. Harrison's Principles of Internal Medicine. Columbus, Ohio: McGraw Hill, 2004. P. 1561–1565.
2. Hobbs J.R., Kreinovich V. Optimal choice of granularity in commonsense estimation: why half-orders of magnitude // Proceedings of the Joint 9th World Congress of the International Fuzzy Systems Association and 20th International Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society IFSA/NAFIPS 2001. Vancouver, Canada, July 25–28, 2001. P. 1343–1348.
3. Hobbs J., Kreinovich V. Optimal choice of granularity in commonsense estimation: why half-orders of magnitude // International Journal of Intelligent Systems. 2006. V. 21, N. 8. P. 843–855.
4. Le Gal G., Righinin M., Roy P.M., Sanchez O., Aujesky D., Bouameaux H., Perrier, A. Prediction of pulmonary embolism in the emergency department: the revised Geneva score // Annals of Internal Medicine. 2006, V. 144, No. 3, P. 165–171.

5. Pedrycz W., Skowron A., Kreinovich V. (eds.). Handbook on Granular Computing. Chichester, UK: Wiley, 2008.
6. Pregerson B. Quick Essentials: Emergency Medicine. Bel Air, California: E.D. Insight Books, 2004.
7. Wadsworth H.M. (editor). Handbook of statistical methods for engineers and scientists. New York: McGraw-Hill Publishing Co., 1990.

ГРАНУЛЯРНОСТЬ ОБЪЯСНЯЕТ ЭМПИРИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ 3 В ОТНОШЕНИЯХ МЕЖДУ ВЕРОЯТНОСТЯМИ ТРОМБОЭМБОЛИИ ЛЁГОЧНОЙ АРТЕРИИ У РАЗЛИЧНЫХ КАТЕГОРИЙ ПАЦИЕНТОВ

Б. Ривера¹

научный сотрудник, аспирант, e-mail: barivera@miners.utep.edu

Ф. Запата²

научный ассистент, Ph.D. (Computer Science), e-mail: fazg74@gmail.com

В. Крейнович¹

к.ф.-м.н., профессор, e-mail: vladik@utep.edu

¹Техасский университет в Эль Пасо, США

²Научно-исследовательский институт производственных и инженерных систем (RIMES), Техасский университет в Эль-Пасо, Эль-Пасо, США

Аннотация. Тромбоэмболия лёгочной артерии (ТЭЛА) — очень опасное заболевание, которое сложно обнаружить. Для диагностики тромбоэмболии лёгочной артерии практикующие врачи складывают из косвенных признаков этого заболевания единый балл и затем классифицируют пациентов по категориям: с низкой, умеренной и высокой вероятностью ТЭЛА. Эмпирический анализ показывает, что когда мы переходим от одной категории к другой, вероятность ТЭЛА увеличивается в 3 раза. В этой статье мы приводим теоретическое обоснование этого эмпирического отношения между вероятностями.

Ключевые слова: тромбоэмболия лёгочной артерии, гранулярность, низкая вероятность ТЭЛА, умеренная вероятность ТЭЛА, высокая вероятность ТЭЛА.

ON APPLICATIONS OF LENNARD-JOHNES POTENTIAL AS A SOCIAL FORCE FOR CROWD BEHAVIOR MODELING

L.V. Rozanova¹

Ph.D., Postdoctoral Researcher, e-mail: luroza@byg.dtu.dk

A.Y. Temerev²

Research Intern, e-mail: temerev@miriamlaurel.com

E.V. Myakisheva³

Senior Teacher, e-mail: elena-myakisheva@yandex.ru

¹Danish Technical University

²Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne

³Omsk State University n.a. F.M. Dostoevskiy

Abstract. In this paper we provide the short overview of the currently existing approaches to modeling the crowd behavior. We consider the crowd as a set of particles moving under influence of physical, social and psychological forces. Starting from the Helbing's social forces model to describe the crowd motion we introduce Lennard-Johnes potential for modeling interaction force between individuals in the crowd. We show that Lennard-Johnes potential can account for the people's desire to preserve an optimal physical and social distance between each other; however, some modifications needs to be introduced in its calculations to account for directional anisotropy and other physical and behavioral aspects of motion of people within the crowd. In order to provide a performance evaluation of this model, we show a preliminary set of results obtained in a simulated scenario.

Keywords: social force model, evacuation modeling, crowd modeling, Lennard-Johnes potential, particle model.

1. Introduction

Crowd dynamics modeling is an open research topic that has attracted many investigations so far. The complexity of this problem stems from some objective difficulties in formalizing the human behavior, which dynamics are determined by parameters of physical, social and psychological nature that can't be accurately represented in their totality; their stochastic nature and complexity of verification, even with rich experimental statistics accumulated. On the other hand, crowd modeling has now become an important issue in many fields including architectural design, military simulation, safety engineering, computer-generated imagery etc.

To investigate the crowd dynamics researchers concentrate on different aspects of the crowd dynamics, e.g. movement patterns, handling external events, emerging effects in large crowds etc. Despite the fact that this research area is actively

developing, only a small number of existing proposals takes into account all sides of crowd behavior in complex. In most existing models, only the physical and social interaction aspects of crowd motion are considered, neglecting to account for individual psychological variations, which make a significant contribution to the choice of strategy and tactics of the movement of individuals and overall crowd dynamics.

Many approaches and modeling methods are used to describe the crowd behavior. They can generally be divided into several classes:

- Flow-based: These models are based on an analogy with the continuous flow of fluid or gas and describe changing of density and velocity with time using partial differential equations such as Navier-Stokes or Bernoulli equations (Henderson, 1971; Bradley, 1993; Hughes, 2002 et al.).
- Particle-based approach to crowd modeling stems from the representation of the crowd as a set of homogeneous particles whose motions in physical space are determined by the influence of various forces described by some global and local laws on the basis of Newtonian mechanics (Helbing, 1995; Bratsun, 2013 et al.).
- Agent based: each individual in a crowd is represented as an autonomous agent, whose behavior is regulated by sets of properties and interaction rules. Each agent may take decisions independently (Braun, 2003; Pelechano, 2005 et al.).
- Cellular automata based: the moving field is represented as a finite regular grid of cells each of which has a finite number of states with the given transition rules. These rules determine a new state of each cell in terms of its current state and states of the cells in its neighborhood (Varas, 2007; Daoliang, 2006; Chertock, 2012 et al.).
- Mixed approaches that use a combination of several of the above modeling methods (Zheng, 2002; Guo, 2008 et al.).

We are going to consider the particle-based approach, outlined by the Helbing model, with some additions from agent-based models.

The social force model proposed by Helbing [1] has made a significant contribution in this area. In this model each individual in a crowd is represented as a particle with associated mass and velocity moving under influence of mixed physical and social forces. Some modifications of the model give a possibility to describe the crowd behavior in the state of panic during the evacuation in emergency situations such as fire [2].

In recent years the social forces models have received numerous modifications and extensions by other researchers [1,3,4].

Among the models of this class the work of Hoogendoorn and Bovy [5] should be noted. They investigated pedestrians' behavior in the choice of routes and activity scheduling. The model was optimized by dynamic programming methods for different traffic conditions.

Another interesting model [6] was developed to describe short term behavior of individuals as a response to the presence of other pedestrians. Authors used a dynamic and individual-based spatial discretization, representing the physical space.

The model was calibrated using data from actual pedestrian movements, manually taken from video sequences, and produced good results.

Thus, we can summarize that particle-based models successfully simulate the most typical phenomena of crowd dynamics and achieve very realistic simulation results. The main problem of this approach is the necessity of homogeneity of the particles that in reality, of course, is not observed. Assigning individual parameters to particles in such models in most cases moves them into the agent-based or mixed classes that makes them much more difficult in analytic investigation.

2. Model description

2.1. Crowd behavior: determinants and principles of crowd movement

Crowd dynamics modeling makes it necessary to take into account a huge number of factors that affect the behavior of each individual in the crowd. First of all, these factors include physically measurable parameters, such as the motion space configuration, physical position and velocity of each participant.

Social factors, for example the presence or absence of social ties, social norms and cultural characteristics of individuals in the crowd are more complex to measure. These factors are more difficult to be formalized, but they make a significant contribution to the overall crowd dynamics, determining such phenomena as following the leader, grouping, queues formation, hustling etc.

Finally, the individual psychological characteristics of participants: their emotional state, assessment of the situation, decision-making, forecasting and planning are essential but very difficult to represent, especially analytically.

Also, it might be necessary to take into account the variety of participants' physical condition, e.g. their age, the presence of certain disabilities, as well as characteristics of the environment, such as visibility, presence of signs, etc. Taking these factors into consideration, we formulated the following principles describing the movement of each individual in the crowd:

1. Each individual tries to achieve a certain target can be a location (e.g. "Exit") or direction (e.g., "right"). Also, the target can be dynamic (e.g., "follow the leader" or "go to the nearest aisle").
2. Each individual tends to move with the most comfortable velocity which depends on the psychological evaluation of the nearest space and the individual state.
3. Every individual makes a decision about his future movement based on his local knowledge about the nearest environment limited by his or her field of view, trying to avoid collisions with other people, walls and obstacles and minimize uncertainty.

2.2. Interaction levels

Similar to Helbing's social forces model let $r_\alpha(t)$ be the location of an individual α . The change of the current position with time is given by the equation:

$$\frac{dr_\alpha(t)}{dt} = v_\alpha(t). \quad (1)$$

Denote $F_\alpha(t)$ the sum of physical, social and psychological forces influencing each individual α and $\xi_\alpha(t)$ — random (or caused by factors not included in the model) fluctuations of the individual behavior, then:

$$\frac{dv_\alpha}{dt} = F_\alpha(t) + \xi_\alpha(t). \quad (2)$$

2.2.1. Physical space: target direction and obstacle avoidance

The target force may be directed to the nearest visible exit marker (sign, wide door), or actual exit. The location of actual exit is not always known beforehand.

Also is possible that the desired direction e_0^α moves from physical point to the individual. By this way we describe a leadership phenomena. In this case known phenomena caused by the emergence of a leader in the crowd can be represented.

Each individual α is moving to the direction e_α^0 adapting the actual velocity v_α to the desired speed v_α^0 , $v_\alpha = v_\alpha^0 e_\alpha^0$, within a relaxation time τ_α . $F_\alpha(t)$ is then given by the equation:

$$F_\alpha(t) = \frac{1}{\tau_\alpha}(v_\alpha^0 e_\alpha^0 - v_\alpha) + \sum_{\beta \neq \alpha} F_{\alpha\beta}(t) + \sum_O F_{\alpha O}(t) + \sum_P F_{\alpha P}(t), \quad (3)$$

where $F_{\alpha\beta}(t)$ is a social distance function describing the social forces acting on the individual, $F_{\alpha O}(t)$ is repulsive forces describing the individual need to keep a safety distance to walls and obstacles O , $F_{\alpha P}(t)$ is a psychological field force in the part of psychological map P .

Individuals keep a safety distance from walls and obstacles. The closer he or she is to them, the more uncomfortable the individual feels and the more intensive a repulsive force $F_{\alpha O}(t)$. This force decreases monotonically with the distance $\|r_\alpha - r_O^\alpha\|$ between the place of the individual r_α and the nearest point of the walls and obstacles. In the simplest case, this force can be expressed by the following equation in terms of a repulsive potential V_O :

$$F_{\alpha O}(t) = F_O(r_\alpha(t)) = -\nabla_{r_\alpha} V_O(\|r_\alpha - r_O^\alpha\|). \quad (4)$$

2.2.2. Social interactions: constructing the social distance function

As we have already noted, at the social level interpersonal interaction is determined by many social and socio-psychological factors such as social norms, cultural features, social boundaries, social relations etc.

Thus, the physical distance between people during movement is different and depends on social features as well as the requirement to avoid collisions and provide a free space for movement. On close range, people will attempt to keep distance between each other; but on longer ranges, they will try to come closer, to seek support and look for exit together. The grouping tendency is enhancing in the situations of uncertainty. An illustration of this fact is the herding behavior and movement along the walls in the situation of poor visibility or disorientation in the absence of guidelines or contradictory impulses to action.

For modeling this force we propose to use the function similar to the Lennard-Jones potential directed from the individual α to β (Fig.1). Its advantage is that it can account for both "attractive" and "repulsive" forces in Helbing model:

$$F_{\alpha\beta}(t) = -\nabla_{d_{\alpha\beta}} \epsilon_{\alpha\beta} \left[\left(\frac{\sigma_{\alpha\beta}}{\|r_{\alpha} - r_{\beta}\|} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma_{\alpha\beta}}{\|r_{\alpha} - r_{\beta}\|} \right)^6 \right], \quad (5)$$

where $\|r_{\alpha} - r_{\beta}\|$ is the distance between α and β , $\epsilon_{\alpha\beta}$ is the depth of potential well (max attraction force), and $\sigma_{\alpha\beta}$ is the distance where the attraction becomes zero.

For homogeneous populations $\epsilon_{\alpha\beta} = \epsilon$ and $\sigma_{\alpha\beta} = \sigma$. In general case $\epsilon_{\alpha\beta} \neq \epsilon_{\beta\alpha}$ and $\sigma_{\alpha\beta} \neq \sigma_{\beta\alpha}$.

The Lennard-Jones potential can also be approximated by Buckingham's function with the exponential repulsive part, that could be more convenient to implement due to the relative computational efficiency:

$$F_{\alpha\beta}(t) = -\nabla_{d_{\alpha\beta}} \tilde{\epsilon}_{\alpha\beta} \left[\exp \frac{\|r_{\alpha} - r_{\beta}\|}{\tilde{\sigma}_{\alpha\beta}} - \left(\frac{\tilde{\sigma}_{\alpha\beta}}{\|r_{\alpha} - r_{\beta}\|} \right)^6 \right]. \quad (6)$$

Social distance function is computed for each pair of individuals in their field of visibility. The gradient of this potential creates a "social force" that can be attractive or repulsive depending on the distance between individuals. Intensity of this force varies according to the social relationships between them. In particular, attraction force is more intensive between familiar people, members of a group or family.

The proposed function allow us to take into account both of the opposite trends in social behavior observed during the motion — keeping a comfort distance and grouping.

2.2.3. Psychological field: mapping the motion space

The individual moving trajectory is determined not only by the physical and social forces acting on the person, but also his/her psychological evaluation of the situation and surroundings.

Having cognitive abilities, an individual is able to estimate possible trajectories of movement and to choose subjectively optimal from them. Thus people precept

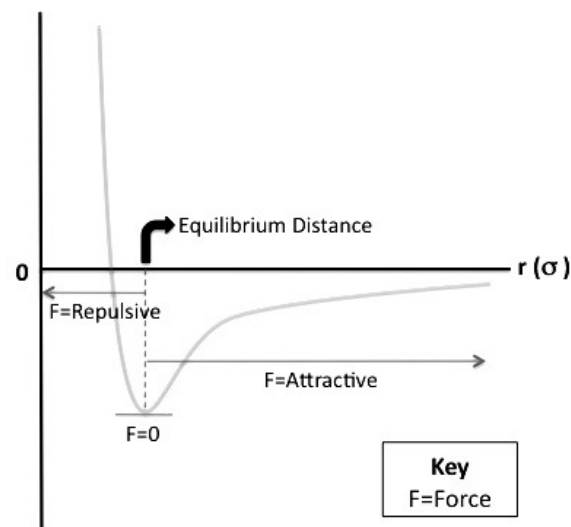


Figure 1. Social distance function

the surrounding area and create individual cognitive field maps. Each map includes areas with more or less comfort zones. The person choosing the trajectory tends to minimize the psychological costs, e.g. moving to the most psychologically beneficial parts of the field. Note that this path is not always the shortest or less time expensive [7].

It is also important to note that the behavior of an individual can be both field-dependent and field-independent, determined by cognitive personality, emotional state and specifics of the situation [8]. People who exhibit field-dependence tend to rely on outer information in decision making; field-independent people tend to be more autonomous, that may be a significant factor in determining individual movement strategies.

The individual psychological mapping has a pronounced specificity in a situation of certainty and uncertainty. In last case people are more likely to take emotional decisions; they show field-dependence behavior (including socio-dependent).

How to systematize the cognitive field map of different people? It is clear that the mapping is individual, but some common features to all or certain categories of participants exist. For example, a dark space will be less attractive than illuminated, the familiar path has more priority than the unknown, guide signs and signals may also mark parts of field as a more or less favorable to the movement. Furthermore, the occurrence of obstacles (e.g., the collapse of building structures) can mark the surrounding area as dangerous and costly for movement. Maps of people with different disabilities, such as blind or injured, or disoriented people (for example in the poor visibility situation) will also have similarities — they will seek a support and move along the walls or in the company of other individuals, and avoid open space, i.e. areas near walls will be marked as more suitable for further movement.

Psychological field map can be represented as a landscape with different heights

or areas with greater or lesser density, which can be formalized in terms of the social-forces model as additional forces acting on the individual. In discomfort (dangerous) areas the force $F_{\alpha P}(t)$ directs toward the more psychologically comfortable (safe) zone will acts on each individual. In the individual field of view, there are may be several such zones, and, assessing a cost function for each possible path to the current time, we describe a process for forecasting and planning for each person.

Such zones can be either homogeneous or heterogeneous, depending on the situational context and structure of the motion space. For example, a psychological risk evaluation is not uniform near the fire, building collapse or radioactive contamination zone and practical uniform close to walls in the situation with low visibility conditions. In the last case the walls act as orientation points.

So, the psychological field function can be taken as:

$$F_{\alpha P}(t) = \begin{cases} C_P, & P \text{ is homogeneous,} \\ -\nabla_{r_\alpha} V_{p_{\max}}(\|r_\alpha - r_{p_{\max}}^\alpha\|), & P \text{ has } p_{\max}, \end{cases} \quad (7)$$

where C_P is a constant, different for different parts of field, $V_{p_{\max}}$ is a repulsive potential from the maximal discomfort point $p_{\max}$.

3. Simulations

According to the model we have created a Mathematical simulation for investigation the pedestrian flow dynamics in some simple situations.

The simulation environment is constructed as follows. We start with the rectangle region delimiting the evacuation space. Within this region, the following objects are set up:

- People — individuals trying to escape the space, modeled as particles with specific constraints. People are the only moving objects in the model;
- Walls and obstacles — rectangular impassable regions;
- Exits — the target regions where people should arrive, completing the evacuation. When a person crosses the exit boundary, she disappears from the model and its calculations;
- Special regions — the delimited areas where psychological forces and/or movement constraints are added.

The simulation advances in discrete timeframes. Within each timeframe, the following sequence of operations is performed:

- For each person in the model, the total force acting on him is calculated. It is a vector sum of all specific forces, which are:
 - Repulsive forces of walls and obstacles. In some contexts, walls can use Lennard-Johnes potential, but most commonly, exponential potential is applied;
 - Attractive force of the exit region. This force is constant; if there are multiple exits, the force operates on the nearest one.

- Lehnard-John potentials of all other individuals in the model. It works as the attractive force if the individual considered is far enough, and the repulsive force if she is nearby. The individuals can be arranged in "groups" — where the attractive part of the force between individuals in different groups is omitted, which enables gathering effects. To avoid extremely strong forces, the scale of these vectors is capped at some pre-selected level.
- Special area forces — e.g. the psychological forces of uncomfortable environment, leading away from the region;
- Fluctuations — a small force with random direction and random magnitude is applied to each individual, to account for inevitable random variations in behavior.
- The total force is used to calculate acceleration applied to each individual, using the Newton's second law;
- Using Velocity Verlet integration algorithm, the acceleration vectors are integrated to velocities vectors;
- Human movement constraints are applied to all velocity vectors (all velocities are anisotropically rescaled and/or capped according to physical capabilities of individuals and movement direction — e.g. people move much faster in forward rather than backward directions.)
- Velocities are then integrated (again with Velocity Verlet) to the new positions of all people;
- Collisions are processed. If a person is too close to another person or to a wall or an obstacle, he is moved back to the minimum distance, and their velocities are modified according to the equation for two-dimensional perfect inelastic collision (walls and obstacles are not moving, of course).

This simple process can account for many peculiarities of human movement, enabling rich behavioral patterns observed in real evacuation experiments. We consider the following simulation set-ups:

1. A square room with the single exit and an obstacle;
2. A square room with the central area of poor visibility and the single exit;
3. A rectangular room with two exits and two randomly assigned groups;
4. A rectangular room with two exits on the opposite sides, a narrow pass and two opposite streams of evacuating persons.

Initially (at time $t = 0$) all pedestrians stand at some random location in the room and start to move in order to escape from the room according to the implemented rules.

3.1. Egress from the room with the single exit and obstacle

Even with this simplest configuration, complex interaction phenomenas can be observed, described in Helbing's papers and elsewhere. Among them are following:

- Herding and ignorance of available exits. If people are not sure what is the best thing to do, there is a tendency to show a "herding behavior", i. e. to

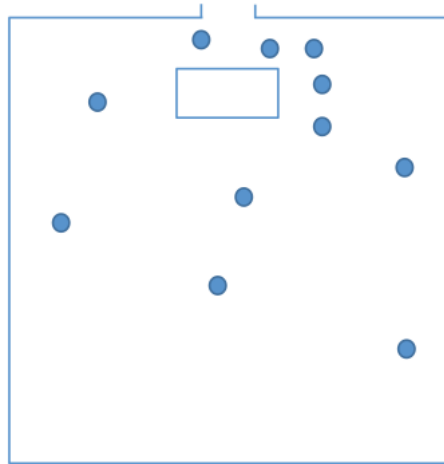


Figure 2. Egress the room with the single exit and obstacle

imitate the behavior of others. This effect is modeled by attraction factor in Lennard-Johnes potential (and, specifically, the relation of resulting gradient force to target force). When the target-directed force is weak enough, pedestrians observably gather in herd-like structures.

- “Freezing by heating”. At sufficiently high pedestrian densities, lanes are destroyed by increasing the fluctuation strength: “a solid state” is formed. It is characterized by an at least temporarily blocked, “frozen” situation so that one calls this paradoxical transition “freezing by heating”. As we use the capped version of Lennard-Johnes potential, the repulsive force might be not enough to stop people from stumbling upon each other, and the “solid state” of densely packed crowd becomes clearly visible. It is the most prominent in the near-exit area, where an obstacle blocks direct movement.

3.2. Egress from the room with poor visibility

We investigated the pedestrian behavior in the situation of evacuation from a room with poor visibility with different initial conditions.

We assumed that the zones close to the walls was more psychological comfortable (safe) for movement than all another space, so in conditions of poor visibility, pedestrians prefer to move along the walls to the nearest exit that widely reported in numerous research: the trajectories are concentrated along the walls, which are the support of the search output (for example, [9, 10]).

As results of simulation we obtained this characteristic pedestrians behavior and according to our results, we can say that Lennard-Johnes potential enables this and other predicted effects much better than the exponential repulsive potential in the base Helbing’s model.

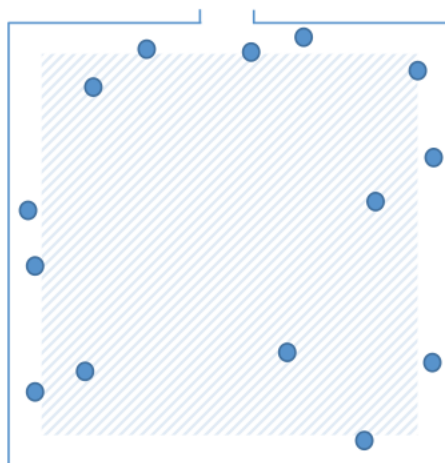


Figure 3. Egress the room with poor visibility

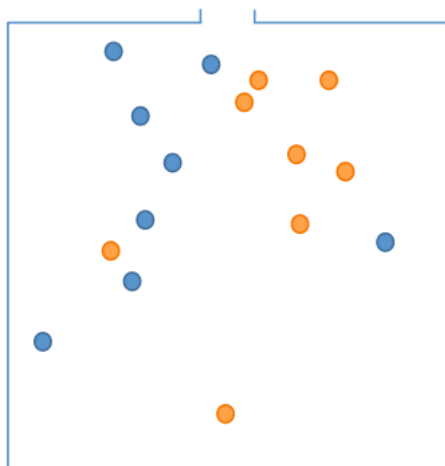


Figure 4. Egress from the room with two assigned groups

3.3. Egress from the room with two assigned groups

While in this configuration the evacuating individuals are randomly and uniformly distributed across the room, each of them is randomly assigned to one of the two groups — and the members of the same group are attracted to each other with much stronger force than to people in other groups (which is implemented by changing the coefficient in the attraction term in Lennard-Johnes potential). This simple arrangement leads to pre-grouping — the new effect that is not predicted in Helbing models, but easily observable in real experiments.

3.4. Two pedestrian streams moving in opposite directions

In this configuration we observe the lane formation: forming lanes of uniform walking direction. When the distance between pedestrians became too high, the

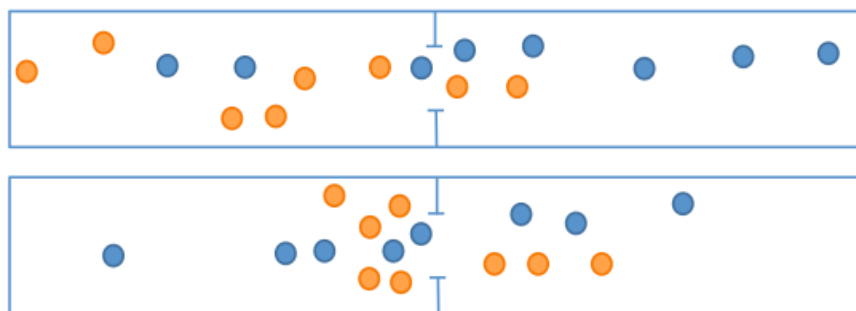


Figure 5. Two pedestrian streams moving in opposite directions

force of attraction is diminished. This leads to formation of several lanes moving to the target direction, where the social force of attraction applies only within a lane.

Also, we obtained the oscillatory flows predicted by Helbing's model. The structure of Lennard-Johnes potential combined with inertia naturally leads to oscillatory flow, as the potential gradient easily changes sign after crossing the repulsion-attraction barrier.

4. Results

The proposed model reflects the general properties of crowd behavior and takes into account individual characteristics of participants of movement, even though a quite simple representation of social forces with Lennard-Johnes potential is used.

The model is flexible and it able to be adapted to different situations (construction of physical space, specifics of participants — their physical and psychological conditions, age and others characteristics).

The extensibility of the model makes it possible to incorporate new factors and to accommodate new features with additional constraints and capping rules.

REFERENCES

1. Helbing D., Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics // *Physical review E*. 1995. Vol. 51, no. 5. P. 4282.
2. Helbing D., Farkas I., Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic // *Nature*. 2000. Vol. 407, no. 6803. P. 487–490.
3. Yu W., Johansson A. Modeling crowd turbulence by many-particle simulations // *Physical Review E*. 2007. Vol. 76, no. 4. P. 046105.
4. Computational modeling of collective behavior of panicked crowd escaping multi-floor branched building / Dmitry Bratsun, Irina Dubova, Maria Krylova, Andrey Lyushnin // *Proceedings of the European Conference on Complex Systems 2012* / Springer. 2013. P. 659–663.
5. Hoogendoorn S. P., Bovy P. H. Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2004. Vol. 38, no. 2. P. 169–190.

6. Antonini G., Bierlaire M., Weber M. Discrete choice models of pedestrian walking behavior // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2006. Vol. 40, no. 8. P. 667–687.
7. Lewin K. Field theory in social science: selected theoretical papers (edited by dorwin cartwright.). 1951.
8. Field-dependent and field-independent cognitive styles and their educational implications / Herman A Witkin, Carol Ann Moore, Donald R Goodenough, Patricia W Cox // *Review of educational research*. 1977. Vol. 47, no. 1. P. 1–64.
9. Isobe M., Helbing D., Nagatani T. Many-particle simulation of the evacuation process from a room without visibility // *arXiv preprint cond-mat/0306136*. 2003.
10. Experiment and modeling of exit-selecting behaviors during a building evacuation / Zhiming Fang, Weiguo Song, Jun Zhang, Hao Wu // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2010. Vol. 389, no. 4. P. 815–824.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ЛЕННАРДА-ДЖОНСА ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СОЦИАЛЬНЫХ СИЛ В МОДЕЛИ ХЕЛБИНГА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОЛП

Л.В. Розанова¹

к.ф.-м.н., научный сотрудник, e-mail: luroza@byg.dtu.dk

А.Ю. Темерев²

научный сотрудник-стажёр, e-mail: temerev@miriamlaurel.com

Е.В. Мякишева³

ст. преподаватель, кафедра кибернетики, e-mail: elena-myakisheva@yandex.ru

¹Градостроительный факультет, Датский технический университет

²Лаборатория ВВР, Лозаннский политехнический университет

³Факультет компьютерных наук, Омский государственный университет
им. Ф.М. Достоевского

Аннотация. В настоящей статье содержится краткий обзор различных методов моделирования поведения толп. В рамках моделей толпы, основанных на поведении частиц, рассматривается использование потенциала Леннарда-Джонса в качестве основной «социальной силы», определяющей взаимодействие между индивидами. Выполненная с помощью программного пакета Mathematica симуляция подтверждает для этого подхода наличие сложных эмергентных феноменов поведения толпы, описанных в модели Хелбинга и другими авторами.

Ключевые слова: поведение толпы, эвакуация, модель социальных сил, модель Хелбинга, потенциал Леннарда-Джонса.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ОТДЕЛА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ ГУ «ДЕПАРТАМЕНТ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ СКО»

Н.В. Астапенко

магистр, старший преподаватель кафедры «Информационные системы»,
e-mail: astankin@mail.ru

Е.С. Моложенко

студент, e-mail: astankin@mail.ru

Северо-Казахстанский государственный университет имени М. Козыбаева,
г. Петропавловск, Республика Казахстан

Аннотация. Основная идея проекта заключается в создании информационной системы, охватывающей все возможные методы оценок состояния окружающей среды, реализуя их в максимально интуитивной и простой в использовании оболочке.

Ключевые слова: экологическая экспертиза, система поддержки принятия решений.

Одним из наиболее важных факторов, определяющих воздействие внешнего мира на живые объекты, является состояние воздушной среды. Научно-технический прогресс, развитие промышленности и транспорта требуют все более интенсивного использования природных ресурсов Земли, что в сочетании с ростом населения и непрекращающейся урбанизацией приводит к усилению нагрузки на окружающую среду и, в первую очередь, — к загрязнению атмосферы.

В настоящее время начинает отчётливо проявляться взаимодействие промышленных выбросов разных стран, которое угрожает существованию жизни на Земле. Поэтому борьба с загрязнением атмосферы становится одной из важнейших социальных проблем глобального характера и требует широкого внедрения различных организационных и технических мероприятий, улучшающих состояние атмосферного воздуха.

Благодаря быстрому росту в области информационных технологий в данный момент становится возможным их использование даже в таких далёких от этих областей как экология. Главным инструментом информационных технологий в данной области являются различные приложения, облегчающие расчёты, различные оценки, мониторинг, принятие решений.

В данном проекте объектом исследования является организация ГУ «Департамент природных ресурсов СКО». А именно — отдел экологической экспертизы этого ГУ, как объект, занимающийся непосредственно контролем состояния окружающей среды.

Экологическая экспертиза — установление соответствия намечаемой хозяйственной и иной деятельности экологическим требованиям и допустимости реализации объекта экспертизы в целях предупреждения возможных неблагоприятных воздействий этой деятельности на окружающую природную среду и связанных с ними социальных, экономических и иных последствий реализации объекта экологической экспертизы.

После того как была изучена предметная область, совместно с экспертами отдела экологической экспертизы были определены требования, а также разработана модель приложения и база данных, был реализован программный продукт — система поддержки принятия решений отдела экологической экспертизы.

Рассмотрим интерфейс программы. На рисунке 1 представлена главная форма приложения. Во время работы на ней отображается информация о параметрах текущего расчёта. Также здесь присутствует кнопка «Подробно», она позволяет получить подробную информацию об источниках загрязнения предприятия. Вторая кнопка «Рассчитать» запускает непосредственно сам расчёт. Главное меню позволяет получить доступ к различным функциям приложения.

Параметры населённого пункта		Параметры предприятия	
Название:	г. Петропавловск	Название:	ТОО "Феникс"
Коэффициент стратификации (A):	200	Число загрязняющих объектов:	1
Скорость ветра U* (м/с):	7	Число источников:	2
Средняя скорость ветра (м/с):	5,9	Точечных:	2
Температура летом (°C):	24,9	Линейных:	0
Температура зимой (°C):	-18,1	Площадных:	0
Коэффициент рельефа (η):	1		

Общая информация

Вид расчёта: Одиночный источник Сезон: Отопительный Учёт фона: Без учёта фона

Кнопки: Подробно, Рассчитать

Рис. 1. Главная форма

Меню «Данные» содержит два подменю: «Данные для расчёта» и «База данных». Меню «Расчёты» скрывает за собой четыре подменю. «Основной», «Обратный», «Расчёт ущерба среде» и «Расчёт ущерба людям». Эти подменю запускают соответствующий их названию расчёт. Точнее его формирование. Меню «Настройки» позволяет настраивать некоторые параметры приложения. Меню «Результаты» позволяет просмотреть результаты последнего расчёта, даже если они были закрыты. Меню «Помощь» содержит в себе три подменю:

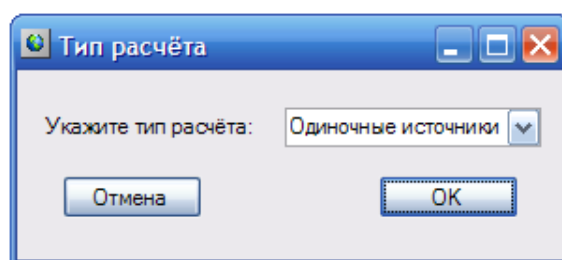


Рис. 2. Тип расчёта

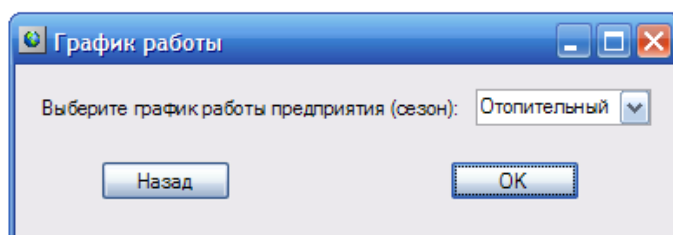


Рис. 3. График работы

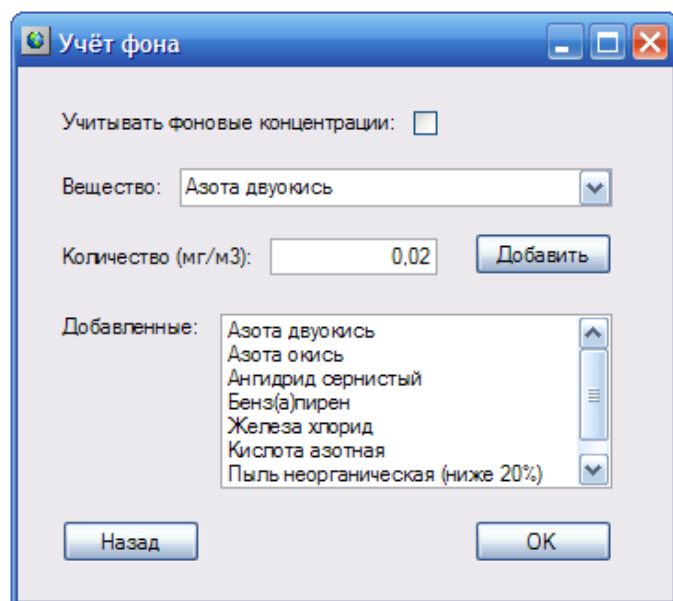


Рис. 4. Учёт фона

«Справка», «Справочник» и «О программе...». «Справка» запускает справку по работе с программой, «Справочник» запускает электронный справочник по расчёту выбросов загрязняющих веществ и, наконец, подменю «О программе...» запускает окно «О программе...».

Рассмотрим пример формирования расчёта и его проведение на примере основного расчёта. Итак, запустив формирование расчёта, мы видим окно

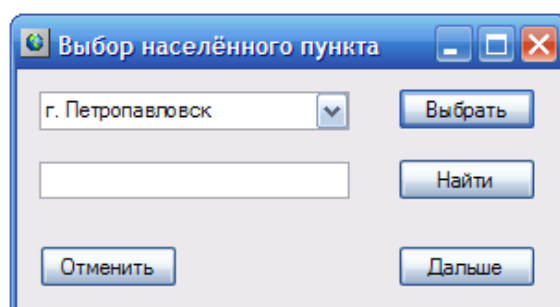


Рис. 5. Выбор населённого пункта

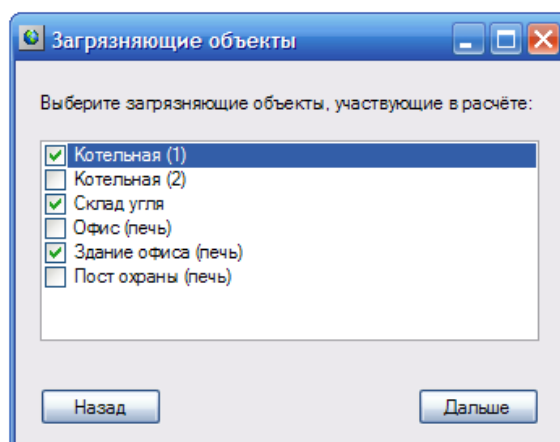


Рис. 6. Выбор загрязняющих объектов

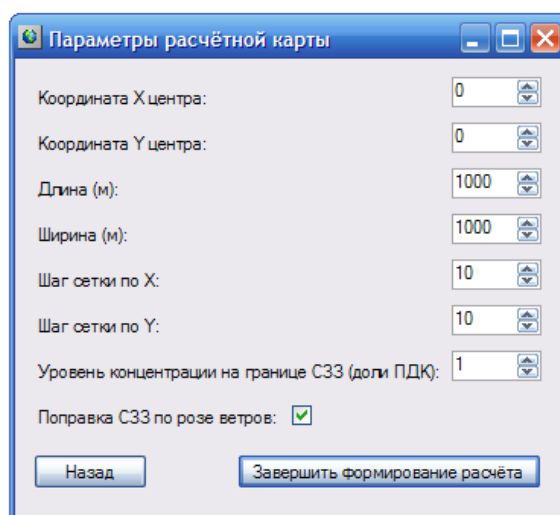


Рис. 7. Параметры расчётной карты

«Тип расчёта», реализованное в соответствии с рисунком 2. Здесь необходимо выбрать тип основного расчёта: по одиночным источникам, линейным или

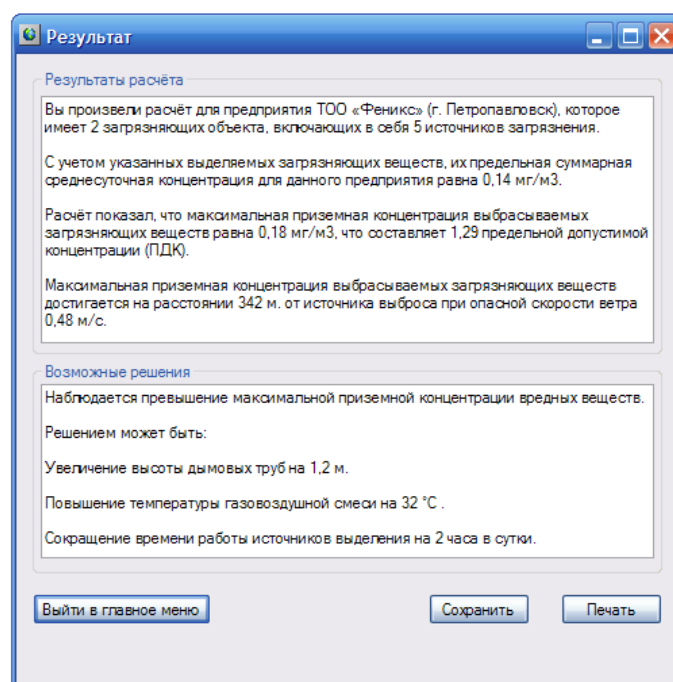


Рис. 8. Окно результата

например автомобильный расчёт.

Далее всё проходит в такой же интуитивно-диалоговой форме. Необходимо определить график работы предприятия (рисунок 3), а затем определить, будет ли при расчёте учитываться внешний фон загрязняющих веществ, и если да, выбрать, какие вещества присутствуют и в каком количестве (рисунок 4).

После того, как определены дополнительные параметры, в расчёт непосредственно из базы данных выбирается населённый пункт (рисунок 5).

Затем выбирается предприятие из доступных в этом населённом пункте, форма для выбора реализована аналогично форме «Выбор населённого пункта».

После того, как было выбрано предприятие, происходит выбор из загрязняющих объектов, принадлежащих этому предприятию (рисунок 6).

Заключительным этапом формирования этого типа отчёта является определение параметров расчётной карты (рисунок 7). Эти данные необходимы для осуществления графического расчёта — отображения изолиний концентраций веществ и санитарно-защитной зоны. Следует отметить, что данная функция ещё не реализована, но будет добавлена позже.

После того, как введены последние данные, необходимо нажать кнопку «Завершить формирование расчёта». После этого пользователь возвращается на главную форму и может запустить расчёт, нажав «Рассчитать». Результат выводится в виде текстового сообщения, что максимально упрощает его восприятие (рисунок 8). В этом же окне могут выдаваться рекомендации по решению возникших проблем.

Так как вся работа производится на основе определённой методики, предо-

ставленной сотрудниками отдела экологической экспертизы, то упоминаемые выше решения также определены и фиксированы. Это и есть так называемые мероприятия по урегулированию выбросов. Следовательно, нет необходимости в их добавлении и удалении.

Во время вывода результата пользователь получает не только результаты расчёта, но и сразу же все возможные варианты решения проблемы, если она есть.

В процессе выполнения проекта была спроектирована и разработана система поддержки принятия решений отдела экологической экспертизы ГУ «Департамент природных ресурсов СКО». Идея такого программного продукта показала свою состоятельность. Приложение выполняет требуемые функции. В итоге следует отметить, что программа, реализованная в данном проекте, является не конечной версией. Для создания полномасштабного приложения необходимо добавить ещё много функций. Это может быть достигнуто усовершенствованием данной программы в будущем.

CREATION OF THE SYSTEM OF SUPPORT OF DECISION-MAKING OF DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ASSESSMENT FOR "DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES OF NKS"

N.V. Astapenko

Senior Teacher, Magister, e-mail: astankin@mail.ru

E.S. Molozhenko

Student, e-mail: astankin@mail.ru

North Kazakhstan State University n.a. M. Kozybayev, Petropavlovsk, Republic
of Kazakhstan

Abstract. The main idea of the project consists of creation of the information system covering all possible methods of estimates of a state of environment, realizing them in the most intuitive and simple cover in use.

Keywords: environmental assessment, system of support of decision-making.

РАЗРАБОТКА WEB-ПРИЛОЖЕНИЯ «МЕРОПРИЯТИЯ» ДЛЯ САЙТА КАФЕДРЫ ИС

Н.В. Астапенко

магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Информационные системы», e-mail: astankin@mail.ru

А.А. Носов

студент, e-mail: astankin@mail.ru

Северо-Казахстанский государственный университет имени М. Козыбаева,
г. Петропавловск, Республика Казахстан

Аннотация. Основная идея проекта заключается в создании web-приложения «Мероприятия», позволяющего автоматически структурировать документы на основе информации, введенной в базу данных преподавателями кафедры ИС.

Ключевые слова: web-приложение, система документооборота, мероприятия.

Существенное преимущество построения web-приложения заключается в том, что его работа не зависит от операционной системы клиента. Отпадает необходимость создавать приложения для различных операционных систем, что даёт возможность использовать систему автоматизации электронного документооборота независимо от платформы клиента. В данном проекте рассматривается создание web-приложения «Мероприятия» для сайта кафедры «Информационные системы» Северо-Казахстанского Государственного Университета имени М. Козыбаева. Кафедра «Информационные системы» активно ведёт работу по внедрению информационных технологий в учебный процесс, развитию внутренней сети университета, внедрению web-технологий и создания web-интерфейсов для пользователей.

В настоящее время на работу с отчётами о мероприятиях затрачивается достаточно большое количество времени. Однако не было ни одного программного или web-интерфейса, который бы автоматически структурировал прикрепляемые файлы к мероприятиям. Такой интерфейс позволит значительно упростить работу с файлами.

При разработке проекта были выделены четыре основных раздела для web-приложения «Мероприятия»: просмотр мероприятий, добавления мероприятий, удаление мероприятий, редактирование мероприятий.

Раздел «Просмотр мероприятий» позволяет просматривать информацию о запланированных и прошедших мероприятиях, которые были добавлены в базу данных. Доступ к просмотру имеют все пользователи, так как отсутствует

возможность изменения информации и данные о мероприятиях не конфиденциальны. Интерфейс раздела просмотра мероприятий представлен в соответствии с рисунком 1.

Интерфейс просмотра делится на три группы элементов:

1. Установка фильтра получаемой информации;
2. Выбор выводимой информации;
3. Отображение запрашиваемой информации о мероприятиях в виде таблицы.

Поля «ответственный», «вид» и «тип» мероприятий заполняются согласно информации, хранящейся в базе данных. Эту информацию может добавлять только администратор внутреннего сайта кафедры «Информационные системы».

Название мероприятия	Вид мероприятия	Тип мероприятия	Дата запланированная	Дата фактическая	Ответственный	Участники	Документ
Мероприятие 1	Факультетское	Информационно-аналитическое, организационное и методическое обеспечение воспитательной работы	2014-04-08	2014-04-08	Волкова Анна Васильевна	ИС-10 ИС-11 ИС-12	СРСП
Мероприятие 2	Университетское	Мероприятия по гражданско-патриотическому и правовому воспитанию	2014-04-21	2014-04-21	Гуляева Ангелина Львовна	й1 й2	lab14
Мероприятие 3	Кафедральное	Мероприятия, направленные на формирование социально-значимых качеств и коммуникативной культуры личности студентов, развитие и поддержка талантов	2014-03-08	2014-03-10	Долматова Лариса Владимировна	ИС-10	lab13

Рис. 1. Интерфейс просмотра информации о мероприятиях

Установка диапазона поиска по дате состоит из двух полей: нижняя граница и верхняя граница. С помощью такой структуры выбора дат можно гибко задавать различные диапазоны для поиска. Нижняя граница запланированной и фактической дат представляет собой минимальную дату, находящуюся в базе данных, а верхняя граница — максимальную дату соответственно. Поле «состояние» может принимать три значения:

- Все. Производится выбор всех состояний мероприятий.
- Запланированные. Мероприятия, к которым ещё не был прикреплен отчет о выполнении.
- Прошедшие. Мероприятия, которые содержат отчет о выполнении.

Отображение требуемой информации производится путём установки галочки на нужных столбцах. По умолчанию после загрузки страницы устанавливается вывод всех столбцов. Помимо выбора выводимых столбцов таблицы были добавлены две кнопки. По клику на определённую кнопку производится установка всех флагов и их удаление соответственно.

Для упрощения формирования отчёта о мероприятиях была добавлена кнопка «Показать для печати». При нажатии на неё происходит формирование таблицы согласно установленному фильтру и выбранным столбцам. После чего сформированная таблица отображается на новой странице, не имеющей интерфейса.

Обращения к базе данных для получения информации производятся посредством технологии Ajax. Данное решение позволяет получать запрашиваемую информацию без обновления страницы. Такая особенность даёт возможность спроектировать интерфейс таким образом, что во время задания фильтра поиска и выбора нужной информации для отображения сразу происходит обращение к базе, и на странице формируется таблица, удовлетворяющая выбранным критериям.

При клике на определённый заголовок таблицы производится сортировка всех данных по значениям выбранного столбца. По умолчанию, если сортировка выполняется в первый раз, данные будут упорядочены по возрастанию, в противном случае данные будут упорядочены по убыванию.

Раздел «Добавление мероприятий» позволяет производить добавление нового материала в базу данных. Интерфейс раздела добавления мероприятий представлен в соответствии с рисунком 2.

Значения полей «ответственного», «типа» и «вида» мероприятий берутся из базы данных во время загрузки страницы с использованием технологии AJAX. Для добавления данных необходимо указать название мероприятия, его запланированную дату. Такие мероприятия будут считаться не выполненными. Если необходимо добавить информацию о выполненном мероприятии, то надо добавить документ, подтверждающий его выполнение, и указать фактическую дату прохождения мероприятия.

В разделе «Редактирование мероприятий» производится редактирование информации о мероприятиях. Такая функция может понадобиться в случае ошибочного заполнения данных о мероприятии либо, если необходимо, отметить запланированное мероприятие как прошедшее. Интерфейс вывода данных о мероприятиях практически аналогичен с интерфейсом просмотра добавленных мероприятий. Выводимая информация о мероприятиях осуществляется тем же скриптом, что и в остальных разделах. Выводимая таблица содержит данные о виде и типе мероприятия, его названии, запланированной и фактической датах, участниках и прикрепленных документах, если имеются. Этой информации достаточно, чтобы найти в базе данных запрашиваемое мероприятие. В случае

Просмотр Добавить Редактировать Удалить

Название мероприятия

Кафедральное

Вид мероприятия

Информационно-аналитическое, организационное и методическое обесп...

Тип мероприятия

Дата запланированная (гггг-мм-дд)

Дата фактическая (гггг-мм-дд)

Аманжолова Айман Жолдыбаевна

Ответственный

Участника

Выберите файл Файл не выбран


[ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕКТОРАТ](#)


[ВЫСТАВЛЕНИЕ РЕЙТИНГА](#)


[ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА](#)


[ПОИСКОВАЯ СИСТЕМА "ИРБИС"](#)

 СКГУ, Кафедра "Информационные Системы" 1998-2014

Рис. 2. Страница добавления нового мероприятия

вывода всех столбцов, хранящихся в БД, таблица становится слишком большой для её отображения в текущем макете сайта. При нажатии на заголовках производится сортировка данных по указанному столбцу. В выводимой таблице добавлено одно поле, содержащее кнопку «Изм.». После клика на эту кнопку происходит переход на страницу редактирования выбранного мероприятия.

Раздел «Удаление мероприятий» служит для удаления информации о мероприятии из базы данных. Перед удалением считываются название мероприятия, его вид и тип, запланированная и фактическая даты. После получения нужных значений они передаются в функцию DelMer.

Разработанное web-приложение «Мероприятия» расположено на внутреннем сайте кафедры «Информационные системы». Добавление, редактирование и удаление мероприятий могут проводить только сотрудники кафедры ИС. Разработанный модуль позволит систематизировать документы, относящиеся к организации мероприятий, тем самым значительно сокращая время получения информации о необходимом мероприятии.

CREATION OF THE WEB APPLICATION OF “ACTION” FOR THE SITE OF CHAIR “INFORMATION SYSTEMS”

N.V. Astapenko

Senior Teacher, Magister, e-mail: astankin@mail.ru

A.A. Nosov

Student, e-mail: astankin@mail.ru

North Kazakhstan State University n.a. M. Kozybayev, Petropavlovsk, Republic
of Kazakhstan

Abstract. The main idea of the project consists of creation of a web application "Actions" allowing to structure automatically documents on the basis of information entered into a database by teachers of the chair "Information systems".

Keywords: web application, system of document, action.

РАЗРАБОТКА WEB-ПРИЛОЖЕНИЯ «КУРАТОРСТВО» ДЛЯ САЙТА КАФЕДРЫ ИС

Н.В. Астапенко

магистр, старший преподаватель кафедры «Информационные системы»,
e-mail: astankin@mail.ru

А.В. Повельев

студент, e-mail: astankin@mail.ru

Северо-Казахстанский государственный университет имени М. Козыбаева,
г. Петропавловск, Республика Казахстан

Аннотация. Основная идея проекта заключается в создании web-приложения «Кураторство», которое позволит автоматизированно формировать всевозможные документы и отчёты для кураторов групп и деканата.

Ключевые слова: web-приложение, система документооборота.

Деятельность любых организаций, особенно государственных, сопровождается кипой документации, что является источником проблем, связанных с накоплением большого объёма документов, необходимостью их составления и обработки. В то же время использование бумажной документации крайне неэффективно. Одним из способов снижения остроты данной проблемы является внедрение в организации систем автоматизированного формирования документов. Такие системы могут быть созданы с применением web-технологий, где участник документооборота является пользователем сервиса сети предприятия, а обработчиком выступает специальный сервер, выполняющий приём, обработку, хранение и выдачу информации по запросу.

Актуальностью данного проекта является необходимость в создании раздела «Кураторство» системы автоматизированного формирования документов для сайта кафедры «Информационные Системы», которая позволяла бы автоматически создавать документы на основе введённой пользователями в базу данных информации. Разрабатываемая система позволит облегчить работу с документацией персонала кафедры «Информационные системы», позволит автоматизировать создание отчётов о деятельности кураторов групп кафедры ИС.

Куратор — тот, кто наблюдает за ходом определённой работы или иным процессом. В работе со студентами младших курсов куратор является ключевым звеном. Воспитательная деятельность куратора охватывает самые разные направления: вопросы успеваемости и посещаемости, подготовки к сессии, помощи в сессионный период и анализа результатов сессии, работу с родителями студентов, информирование о проведении различных мероприятий, акций, конкурсов и т.п., помощь в организации различных коллективных дел, социально-психологическая поддержка и так далее. Также в обязанности каждого кура-

тора входит составление отчёта о проделанной им работе, этот процесс может быть значительно оптимизирован с помощью системы автоматизации формирования документов, которая является частью системы автоматизации документооборота.

Структура модуля «Кураторство» для разных классов пользователей различна. Для класса «Куратор» она выглядит следующим образом:

- 1) мероприятия — в данном разделе куратор может просматривать мероприятия, в которых участвует он или его группа. Добавлять собственные мероприятия;
- 2) итоги семестра — в данном разделе куратор вносит новые или изменяет уже имеющиеся данные об успеваемости группы за выбранный им период обучения;
- 3) информация о группе — данный раздел позволяет пользователю вносить новую и изменять старую информацию о группе за выбранный им период;
- 4) актив группы — данный раздел даёт возможность куратору добавлять и удалять должности в группе, а также назначать на эти должности студентов;
- 5) отчёты — данный раздел позволяет пользователю получить отчёт о проделанной работе, на основе имеющейся в базе данных информации.

Для класса «Администратор» структура выглядит следующим образом:

- 1) кураторы — в данном разделе администратор может добавлять в систему новых кураторов и закреплять за ними группы. Также в данном разделе производится редактирование и удаление кураторов из системы;
- 2) группы — в данном разделе администратор может добавлять записи в список групп или удалять записи из списка групп.

Если пользователь класса «Администратор» является по совместительству пользователем класса «Куратор», то помимо своих разделов он получает доступ ко всем разделам пользователя класса «Куратор».

При входе на сайт происходит авторизация пользователя по логину в операционной системе. Если пользователь прошёл авторизацию как куратор, то он получает доступ к следующим разделам: мероприятия; итоги семестра; информация о группе; актив группы; отчёты.

Вид загрузившегося окна после успешной авторизации представлен в соответствии с рисунком 1. Профиль куратора позволяет манипулировать почти всей информацией, заложенной в базу.

В разделе «Мероприятия» куратор может просматривать мероприятия, отсортированные по дате, либо все сразу, в которых участвует его группа, или куратор проводит их сам, удалять свои мероприятия, отмечать выполненные мероприятия. Список мероприятий представлен в соответствии с рисунком 2.

Переход к форме добавления мероприятия осуществляется по нажатию кнопки «Добавить мероприятие».

Добавление мероприятий происходит посредством формы, содержащей следующие поля: название мероприятия; вид мероприятия; тип мероприятия; дата запланированная.

Выпадающие списки «вид мероприятия» и «тип мероприятия» формируются динамически получением их из базы данных.

При нажатии на кнопку «Подробнее» куратор получает доступ к форме, позволяющей ему получить более детальную информацию об интересующем его мероприятии, отметить выполнение этого мероприятия либо удалить его. Функция удаления доступна только в том случае, если ответственным за мероприятие, отображаемое на форме, является сам куратор.

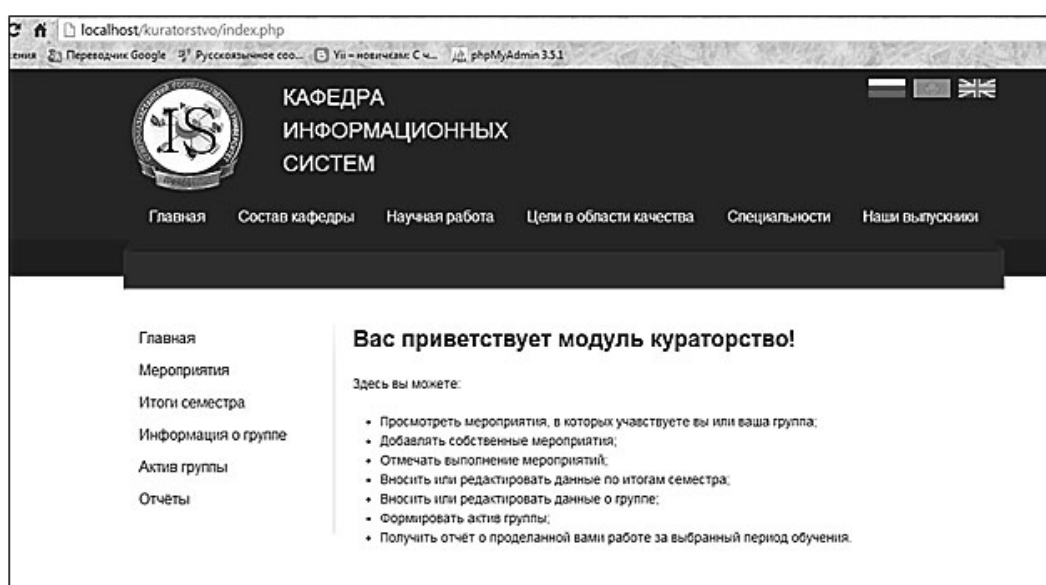


Рис. 1. Успешная авторизация

При сохранении введенной даты в базе данных и при считывании даты из базы данных данные адаптируются под требуемый формат.

Раздел «Итоги семестра» предназначен для добавления, просмотра и редактирования результатов, выбранных в выпадающем списке «семестр» и текстовом поле «год», учебного полугодия группы, закреплённой за куратором. Интерфейс данного раздела реализован в соответствии с рисунком 3. После нажатия на кнопку «Сохранить» данные с формы заносятся в базу данных, если запись за выбранный период уже существует, то она обновляется, в противном случае создаётся новая запись.

Форма состоит из семи текстовых полей, пять из них вводятся вручную, а два последних поля рассчитываются по формулам.

Раздел «Информация о группе» предназначен для добавления в базу основных данных о группе и редактирования этих данных. Также как и раздел «Итоги семестра» каждая запись имеет привязку к году и семестру.

№	Название мероприятия	Запланировано	Проведено	Действие
1	Восьмое марта	08-03-2014	Проведено:	Подробнее
2	Кураторский час, посвященный проблеме подросткового алкоголизма	09-10-2013	Проведено: 10-10-2013	Подробнее
3	Проверка знаний студентов группы ИС-11	06-02-2014	Проведено: 06-02-2014	Подробнее
4	Встреча с представителями компании Microsoft	07-02-2013	Проведено: 14-02-2014	Подробнее
5	Олимпиада по программированию	02-03-2014	Проведено: 02-03-2014	Подробнее

Рис. 2. Список мероприятий

Показатель	Значение
Количество допущенных студентов:	22
Количество недопущенных студентов:	5
Количество студентов, сдавших экзамен на F:	7
Количество отличников в группе:	1
Количество ударников в группе:	5
Процент успеваемости группы:	60
Процент качества в группе:	24

Рис. 3. Итоги семестра

В разделе «Актив группы» куратор имеет возможность формировать актив группы, то есть добавлять должности и назначать на эти должности студентов. Раздел имеет два типа форм. Первая форма предназначена для добавления должности, она состоит из одного текстового поля, под именем «Должность» и кнопки «Добавить». Вторая форма предназначена для назначения студентов на должность или удаления должности, она состоит из двух полей и двух кнопок. Первое поле предназначено для ввода в него имени студента, второе поле не редактируется, а только отображает информацию. После нажатия на кнопку «Назначить» куратор закрепляет за должностью студента, имя которого введено в поле «ФИО». После нажатия кнопки «Удалить» запись об этой должности

удаляется.

Кафедра «Информационные системы»
Отчет куратора гр. ИС-11
За 2 полугодие 2014 учебного года
Куратор группы ИС-11 - Ушакова Екатерина Вячеславовна

1. Состав группы
На начало учебного года кол-во студентов: 25
На конец 2-го полугодия кол-во студентов: 25
Количество девушек: 7
Количество юношей: 21
Количество студентов обучающихся на гр. ИС-11: 2
Актив группы: Зам Старосты - Жевникова Анна Ивановна
Староста - Повелев Антон Валерьевич

2. Мероприятия, проведенные в группе за 2 полугодие
Выполнение плана работы кураторов в группах.

•Мероприятия по гражданско-патриотическому и правовому воспитанию

№ п/п	Число	Тематика	Ответственный	Отметка о выполнении
1	06-02-2014	Проверка знаний студентов группы ИС-11	Ушакова Екатерина Вячеславовна	Отчет куратора

•Мероприятия по духовно- нравственному воспитанию

№ п/п	Число	Тематика	Ответственный	Отметка о выполнении
1	02-03-2014	Олимпиада по программированию	Гудлева Ангелина Львовна	Протокол проведения олимпиады
2	03-04-2014	Бриф-Ринг на тему Паскаль и ты	Астапенко Наталья Владимировна	Отчет куратора
3	08-04-2014	День открытых дверей	Ушакова Екатерина Вячеславовна	Протокол

Рис. 4. Отчет часть I

Кафедра «Информационные системы»
Отчет куратора гр. ИС-11
За 2 полугодие 2014 учебного года
Куратор группы ИС-11 - Ушакова Екатерина Вячеславовна

1. Состав группы
На начало учебного года кол-во студентов: 25
На конец 2-го полугодия кол-во студентов: 25
Количество девушек: 7
Количество юношей: 21
Количество студентов обучающихся на гр. ИС-11: 2
Актив группы: Зам Старосты - Жевникова Анна Ивановна
Староста - Повелев Антон Валерьевич

2. Мероприятия, проведенные в группе за 2 полугодие
Выполнение плана работы кураторов в группах.

•Мероприятия по гражданско-патриотическому и правовому воспитанию

№ п/п	Число	Тематика	Ответственный	Отметка о выполнении
1	06-02-2014	Проверка знаний студентов группы ИС-11	Ушакова Екатерина Вячеславовна	Отчет куратора

•Мероприятия по духовно- нравственному воспитанию

№ п/п	Число	Тематика	Ответственный	Отметка о выполнении
1	02-03-2014	Олимпиада по программированию	Гудлева Ангелина Львовна	Протокол проведения олимпиады
2	03-04-2014	Бриф-Ринг на тему Паскаль и ты	Астапенко Наталья Владимировна	Отчет куратора
3	08-04-2014	День открытых дверей	Ушакова Екатерина Вячеславовна	Протокол

•Мероприятия, направленные на формирование социально-значимых качеств и коммуникативной культуры личности студентов, развитие и поддержка талантов

№ п/п	Число	Тематика	Ответственный	Отметка о выполнении
1	11-05-2014	Кураторский час на тему послания президента	Ушакова Екатерина Вячеславовна	Отчет куратора

•Мероприятия по гражданско-патриотическому и правовому воспитанию

№ п/п	Число	Тематика	Ответственный	Отметка о выполнении
1	18-05-2014	День единства народов Казахстана	Ушакова Екатерина Вячеславовна	Отчет куратора

3. Итоги семестра

Группа	Кол-во допущенных студентов	Кол-во не допущенных студентов	Кол-во студентов, сдавших экзамен на "Е"	Процент успеваемости	Процент качества	Количество отличников	Количество ударников
ИС-11	22	5	7	60	24	1	5

Ушакова Екатерина Вячеславовна

Рис. 5. Отчет часть II

В разделе «Отчёты» куратор на основе введенных им в модуль данных имеет возможность получить готовый отчёт о проделанной им кураторской деятельности с закреплённой за ним группой. Примеры отчётов приведены на рисунке 4 и рисунке 5.

Администратор модуля в отличие от куратора имеет право на добавление в систему новых кураторов, новых групп, а также может выполнить закрепление куратора за группой. При нажатии на каждую кнопку система выводит

подтверждающее сообщение, позволяющее предотвратить случайные нежелательные нажатия на кнопки отправки форм на сервер.

При выполнении проекта был сделан анализ предметной области, рассмотрены существующие аналоги разработанного web-приложения, выбран инструментарий реализации, разработана база данных, спроектирован и реализован интерфейс модуля «Кураторство».

Результатом проекта стала система автоматизированного создания отчётов «Кураторство», позволяющая облегчить процесс документооборота на кафедре ИС.

CREATION OF THE WEB APPLICATION "COACHING" FOR THE SITE OF IS CHAIR

N.V. Astapenko

Senior Teacher, Magister, e-mail: astankin@mail.ru

A.V. Povelyev

Student, e-mail: astankin@mail.ru

North Kazakhstan State University n.a. M. Kozybayev, Petropavlovsk, Republic
of Kazakhstan

Abstract. The main idea of the project consists in creation of a web application "Coaching" which will allow is automated to form various documents and counting for curators of groups and dean's office.

Keywords: web application, system of document.

РАЗРАБОТКА САЙТА ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРАКТИКИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ ВУЗА

Н.В. Астапенко

магистр, старший преподаватель кафедры «Информационные системы»,
e-mail: astankin@mail.ru

С.В. Тарасов

студент, e-mail: astankin@mail.ru

Северо-Казахстанский государственный университет имени М. Козыбаева,
г. Петропавловск, Республика Казахстан

Аннотация. Для повышения качества учебного процесса, в частности, качества проведения практики, было решено разработать информационную систему, которая бы обеспечивала студентов во время прохождения практики необходимыми материалами, а также предоставила им online-связь с руководителем практики.

Ключевые слова: информационная система, организация практики, сайт.

Одним из ключевых требований подготовки специалиста является чётко выраженная профессиональная направленность учебного процесса на формирование у студентов навыков, связанных с характером предстоящей трудовой деятельности. Поэтому обучающимся необходимо закрепление полученных знаний и навыков в реальных условиях, что осуществляется во время прохождения ими практики, для эффективного проведения которой необходима чёткая организация.

Появление информационной системы поддержки организации проведения практик сможет повысить информированность студентов и, как следствие, повысить качество организации и проведения практики. Данная система должна быть доступна как студентам, так и руководителям практик, а также должна иметь простой и интуитивно понятный интерфейс.

В процессе обучения студенты в соответствии с государственными общеобязательными стандартами образования проходят различные виды профессиональных практик: учебно-ознакомительная, учебная, языковая, педагогическая, производственная, преддипломная и другие.

Практика является обязательной частью учебного процесса, направленной на получение студентами практического опыта и навыков, необходимых для дальнейшей профессиональной деятельности.

Руководитель практики до её начала организует необходимую подготовку обучающихся, проводит консультации в соответствии с программой практики, осуществляет контроль за ходом прохождения практики, производит проверку

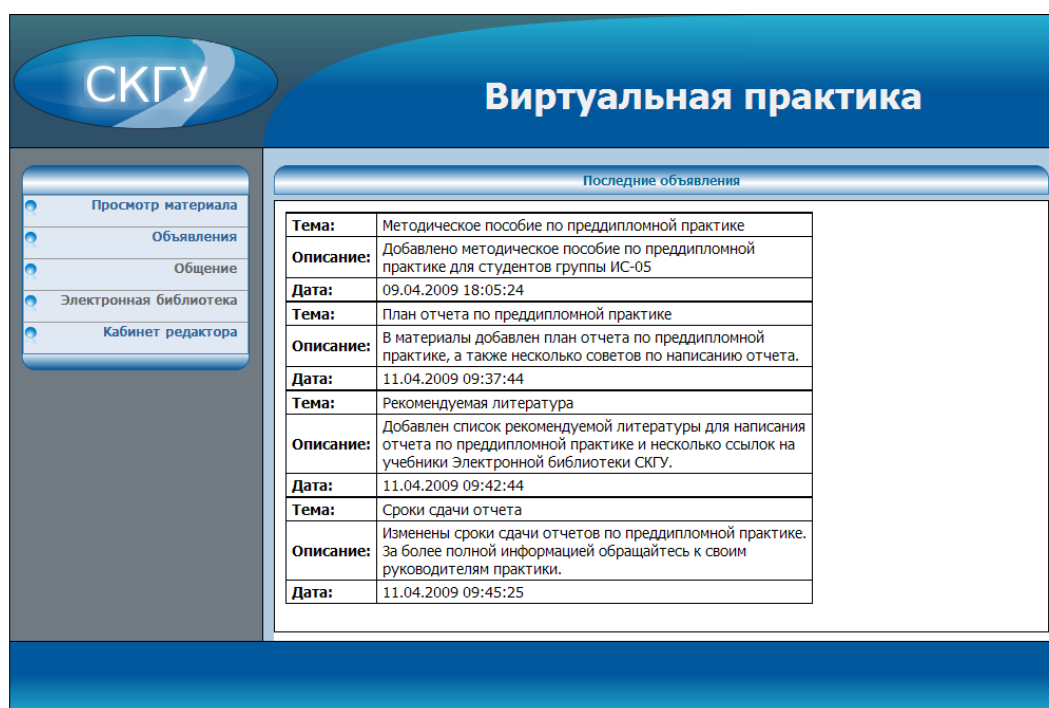


Рис. 1. Главная страница системы

отчётов обучающихся по практике, представляет на кафедру письменный отзыв о прохождении практики, проводит приём защиты отчётов.

Для повышения качества учебного процесса, в частности качества проведения практики, было решено разработать информационную систему проведения практик под названием «Виртуальная практика». «Виртуальная практика» будет представлять собой сайт в сети вуза, с помощью которого практиканты могут ознакомиться с рабочими программами по практикам, необходимыми методическими материалами, шаблонами документов к практике и другой информацией. Руководители практик, в свою очередь, могут добавлять этот материал прямо через специальные формы на сайте. Данная система должна выполнять следующие задачи: поиск материала по практике; скачивание материала; просмотр объявлений; добавление объявлений; добавление и редактирование практик; добавление материала по практике. Также для поддержания гибкости системы необходимо реализовать механизм добавления и редактирования учётных записей для работы пользователей, которые будут добавлять и редактировать материал и объявления.

При входе на сайт любой пользователь считается Студентом и ему доступны следующие функции: поиск материала к практике, скачивание материала, просмотр объявлений. Также будет реализована функция авторизации редактора, представленная простой формой, запрашивающей имя пользователя и пароль. Если введены верные имя пользователя и пароль, то происходит авторизация, и пользователь получает доступ к функциям редактора или администратора. Главная страница для студента реализована в соответствии с рисунком 1.

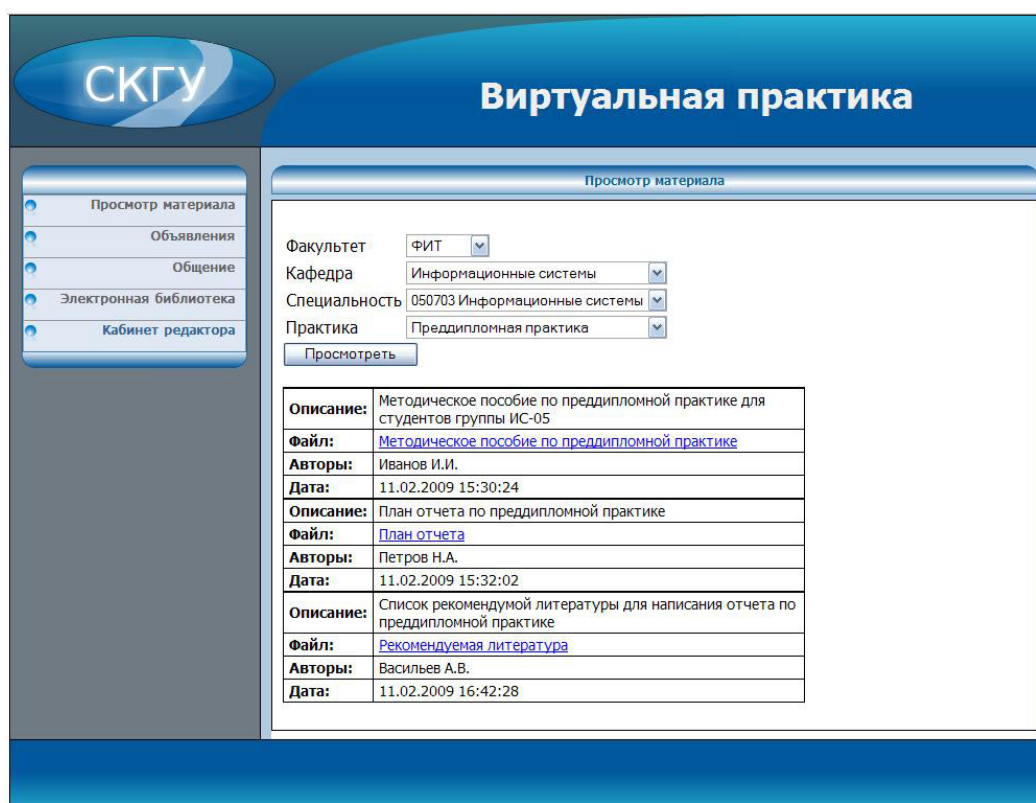


Рис. 2. Страница поиска материала с результатами поиска

Просмотр материала по практике и объявлений реализованы идентичным образом и представлены на рисунке 2. Результаты поиска отображаются в таблице, в которой объявления отделены друг от друга жирной линией. Каждое объявление содержит такие атрибуты:

1. Описание — содержит описание файла, которое вводит редактор при загрузке файла, раскрывает содержание файла;
2. Файл — содержит имя файла, которое также вводит редактор при загрузке файла, кратко описывает содержимое файла, также является ссылкой для скачивания;
3. Авторы — отображает авторов файла, этот атрибут вводится редактором при загрузке файла и содержит фамилии авторов данного материала;
4. Дата — содержит дату загрузки файла в систему, записывается автоматически при добавлении файла.

Любой из файлов, отображённых в таблице результатов поиска, можно скачать, нажав на ссылку в строке с именем Файл соответствующего файла. Чтобы выполнить поиск по другим условиям, достаточно в этой же странице выбрать

Рис. 3. Страница добавления материала

Рис. 4. Страница редактирования объявлений

другие пункты в выпадающих списках формы поиска, которая находится выше таблицы результатов, и нажать кнопку Просмотреть. Система выполнит поиск по новым условиям и выведет результат в таблицу вместо результатов преды-

дущего поиска.

Ссылка «Кабинет редактора» позволяет авторизоваться классу пользователей «Редактор». Страница для редактора реализована в соответствии с рисунком 3. Для редактора доступны такие функции как добавление и редактирование объявлений, добавление и редактирование практик, добавление материала к практикам. При добавлении практик и объявлений в формы вводится только текстовая информация, которая затем сохраняется в соответствующих таблицах в базе данных.

При добавлении материала кроме текста добавляются ещё и файлы, которые необходимо заархивировать, присвоить им уникальные имена, поместить в специальную папку, а информацию о файлах (описание, ссылку для скачивания) нужно записать в базу для последующего поиска и доступа к ним.

Рассмотрим содержимое страницы. В верхней части формы находятся выпадающие списки для выбора специальности и практики. Как упоминалось выше, каждый редактор может работать только с теми специальностями и практиками, которые относятся к кафедре, которую он представляет. Списки Факультет и Кафедра содержат по одному элементу, то есть в списке Факультет находится тот факультет, к которому относится кафедра, на которой работает редактор, а в списке Кафедра находится, соответственно, эта кафедра. В списках Специальность и Практика находятся те элементы, которые соответствуют кафедре редактора.

Для загрузки файла необходимо чтобы все поля формы были заполнены. Рядом с полем Файл находится кнопка Обзор, по нажатию на которую открывается окно выбора файла, в котором необходимо выбрать нужный файл и нажать кнопку Открыть. После этого адрес файла отобразится в поле Файл. В поле Название необходимо ввести название файла. Название должно отражать содержимое файла, так как оно будет впоследствии отображено в виде ссылки для скачивания файла. В поле Описание нужно ввести краткое описание содержимого файла или комментарии к файлу. В поле Автор(ы) необходимо ввести автора или авторов данного файла. Данный атрибут особенно полезен когда загружаются файлы с одинаковым названием, но от разных авторов.

После того, как все поля заполнены, нужно нажать на кнопку Добавить файл. Система произведёт проверку заполненных данных и, если все поля заполнены корректно, то загрузит добавляемый файл и выдаст сообщение о том, что файл успешно добавлен, иначе выдаст сообщение об ошибке.

Если при добавлении объявления редактор допустил ошибку или информация в объявлении устарела, то редактор может отредактировать объявление и внести в него соответствующие изменения. Чтобы отредактировать какое-либо объявление, нужно выбрать в меню пункт Редактирование объявлений. После этого система отобразит список доступных объявлений, и рядом с каждым объявлением будет находиться кнопка Редактировать (рисунок 4).

На данной странице отображены все доступные редактору объявления, которые можно отредактировать. Чтобы перейти к форме редактирования, необходимо нажать кнопку Редактировать рядом с нужным объявлением. После этого система отобразит форму редактирования объявления.

Также в функции редактора входит добавление практик для специальностей своей кафедры. Форма добавления практики довольно проста. В поле Название практики нужно ввести официальное название практики, в списке Специальность выбрать нужную специальность, в списке Форма обучения нужно выбрать форму обучения (очную, заочную и пр.), в списке Курс выбрать нужный курс, для которого осуществляется добавление практики. После этого нужно нажать на кнопку Сохранить, чтобы система сохранила изменения.

В результате выполнения проекта была достигнута его цель — разработана система, отвечающая следующим требованиям: добавление и изменение практик; загрузка материала к практике; просмотр и скачивание материала; добавление и просмотр объявлений. Созданная система может быть в дальнейшем доработана.

CREATION OF THE SITE FOR PRACTICE ORGANIZATION IN EDUCATIONAL PROCESS OF HIGHER EDUCATION INSTITUTION

N.V. Astapenko

Senior Teacher, Magister, e-mail: astankin@mail.ru

S.V. Tarasov

Student, e-mail: astankin@mail.ru

North Kazakhstan State University n.a. M. Kozybayev, Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan

Abstract. It was decided to develop information system for improvement of quality of educational process, in particular qualities of carrying out practice. It has to provide students with necessary materials during practical training, and also provide them online-communication with the head of practice.

Keywords: information system, organization of practice, site.

РАЗРАБОТКА WEB-ПРИЛОЖЕНИЯ «ПОВЫШЕНИЕ КВАЛИФИКАЦИИ» ДЛЯ САЙТА КАФЕДРЫ ИС

Н.В. Астапенко

магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Информационные системы», e-mail: astankin@mail.ru

Р.К. Шоткин

студент, e-mail: astankin@mail.ru

Северо-Казахстанский государственный университет имени М. Козыбаева,
г. Петропавловск, Республика Казахстан

Аннотация. Основная идея проекта заключается в создании web-приложения «Повышение квалификации» для учёта и управления отчётными документами, связанными с повышением квалификации профессорско-преподавательского состава вуза.

Ключевые слова: web-приложение, система документооборота, повышение квалификации.

Сегодня каждый преподаватель старается повысить уровень своих знаний путём прохождения курсов повышения квалификации. После окончаний курсов необходимо составить отчёт и сделать копию сертификата для дальнейшего хранения в бумажном виде в архивах. Таким образом, количество пройденных квалификаций и документов увеличивается, и все сложнее проходит документооборот. Актуальностью данного проекта является необходимость внесения информации о повышении квалификации преподавателей для внутреннего сайта кафедры «Информационные Системы».

Реализованное web-приложение позволит проинформировать пользователей о квалификациях преподавателей, а также вносить и редактировать информацию о квалификации преподавателями.

При запросе ОС на аутентификацию пользователь вводит логин и пароль для входа в систему, далее, если пользователь войдёт в модуль «Повышение квалификации», произойдёт аутентификация пользователя по логину и каждому логину будут сопоставлены права доступа.

У модуля существует 3 уровня доступа:

- администратор;
- преподаватель;
- гость.

«Администратор» — для данного пользователя ограничения в доступе не существуют. Таким образом, «администратор» может делать то, чего не могут делать остальные пользователи. Для класса «администратор» необходимо реализовать следующие функции:

- загрузка нормативного документа;
- добавление информации о повышении квалификации;
- добавление информации о запланированном повышении квалификации;
- скачивание нормативного документа;
- редактирование внесённой информации;
- удаление нормативного документа;
- удаление внесённой информации;
- просмотр информации о пройденных и запланированных повышениях квалификации других преподавателей.

«Преподаватель» имеет возможность вносить информацию о пройденном и запланированном повышении квалификации, также имеет функции редактирования и удаления, но лишь индивидуальных данных, и ничьих больше. Для класса «преподаватель» необходимо реализовать следующие функции:

- добавление информации о пройденном личном повышении квалификации;
- добавление информации о запланированном личном повышении квалификации;
- скачивание нормативных документов;
- редактирование внесённой личной информации;
- удаление внесённой личной информации;
- просмотр информации о пройденных и запланированных повышениях квалификации других преподавателей.

«Гость» может только посмотреть информацию без возможности изменения, редактирования и удаления. Для класса «гость» необходимо реализовать следующие функции:

- скачивание нормативных документов;
- просмотр информации о пройденных и запланированных повышениях квалификации.

Рассмотрим некоторые интерфейсы из разработанных в данном проекте. Так для пользователя страница модуля «Нормативные документы» имеет вывод в виде таблицы, где к каждой строке приложены основные функции: скачать документ, поменять имя файла в базе, удалить файл и загрузить новый файл, в соответствии с рисунком 1.

Страница модуля «Запланированные квалификации» с расположением основных элементов: выборка по году, выборка диапазона, таблица, сортировка по заголовкам столбцов и функциональные кнопки приведены в соответствии с рисунком 2.

Добавление запланированного повышения квалификации — все данные заполняются администратором, выбор ФИО преподавателя из выпадающего списка приведено в соответствии с рисунком 3.

Также при вводе даты администратору нет необходимости вводить дату в формате, понимаемом базой. Здесь используется подключаемый календарь с приятным дизайном, где легко можно выбрать определённую дату, и значения автоматически занесутся в поле.

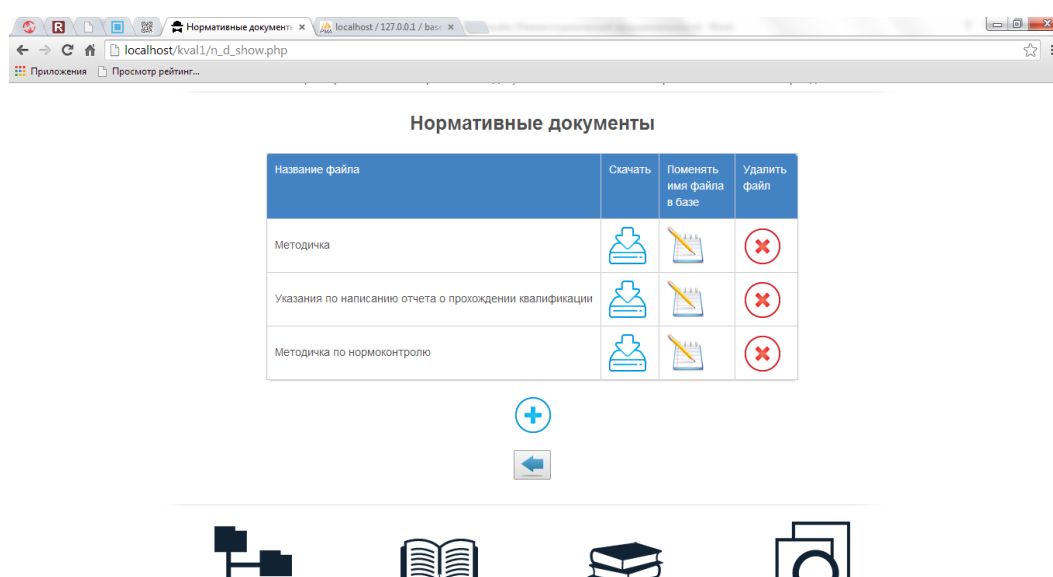


Рис. 1. Страница модуля «Нормативные документы»

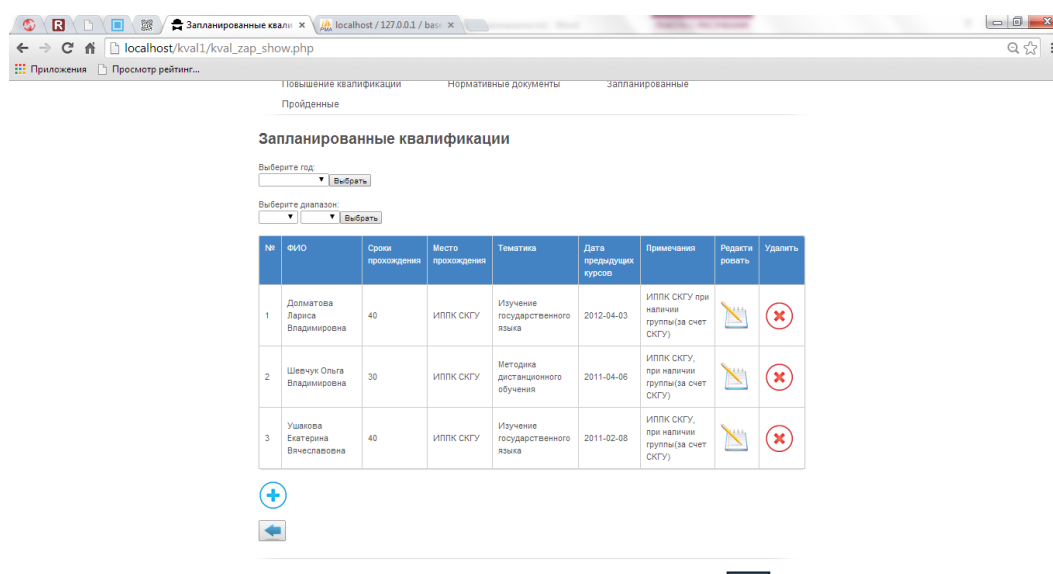


Рис. 2. Страница модуля «Запланированные квалификации»

Редактирование запланированных повышений квалификаций осуществляется через форму, где в поля заносится уже внесённая информация, для удобства изменений, но пользователь должен вновь выбрать ФИО преподавателя из выпадающего списка, так как вывод ФИО при добавлении в форме редактирования является некорректным (меняется кодировка текста), приведено в соответствии с рисунком 4. Страница «Добавление информации» реализована в соответствии с рисунком 5.

При добавлении пройденного повышения квалификации пользователю необходимо внести данные и загрузить сертификат и отчёт о прохождении курсов,

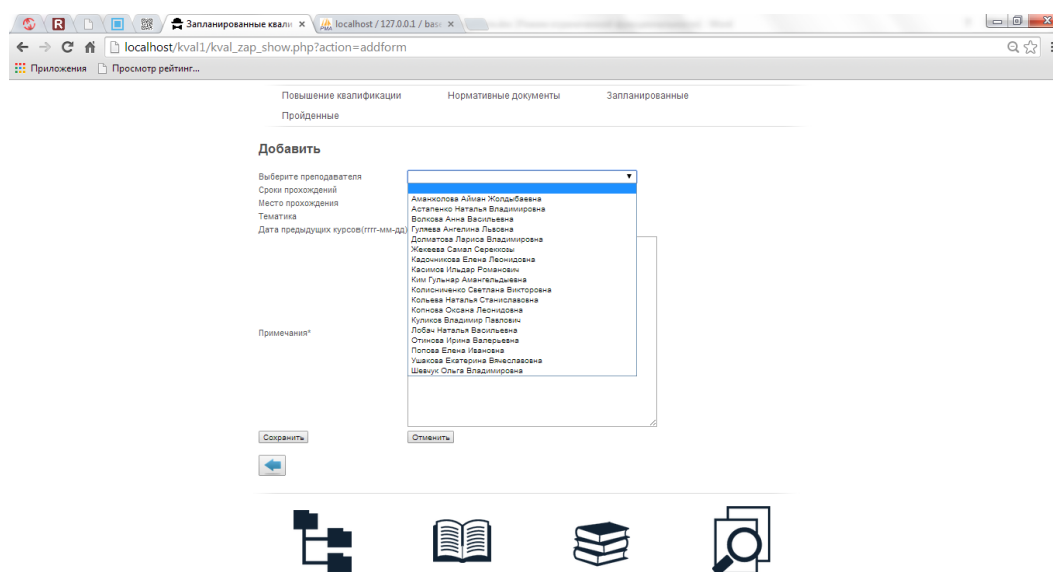


Рис. 3. Форма добавления запланированных курсов

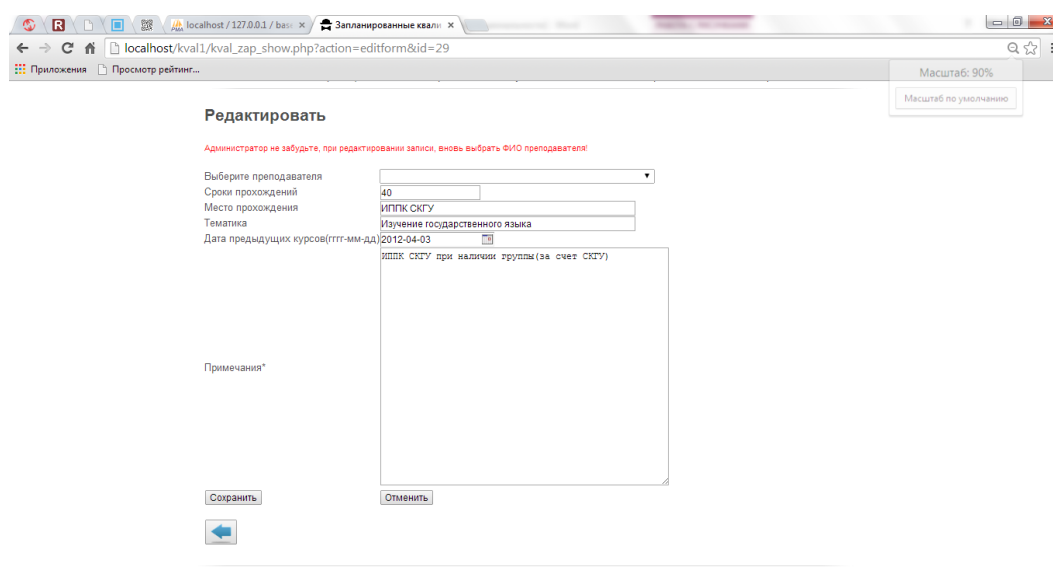


Рис. 4. Форма редактирования запланированных курсов

при вводе даты происходит проверка, в случае если дата начала больше даты окончания, происходит вывод об ошибке. Также проверка на ввод всех данных приведена в соответствии с рисунком 5.

Интерфейс страницы «Пройденных квалификаций» с расположением основных элементов реализован как на странице «Запланированные квалификации».

В результате выполнения проекта были изучены документы по повышению квалификации преподавателей, спроектирована база данных, выполнены разработка, тестирование и отладка web-приложения.

Разработанный модуль автоматизирует процесс документооборота кафедры

Рис. 5. Форма добавления информации

ИС, упрощая добавление и чтение информации о повышении квалификации преподавателей. Поскольку данный модуль впервые будет использован для кафедры ИС, то в итоге будет отвечать следующим требованиям:

- скачивание нормативных документов;
- просмотр информации о повышении квалификации;
- управление нормативными документами;
- управление информацией о повышении квалификации.

В дальнейшем модуль может быть доработан, а именно: реализовано уведомление о необходимости прохождения повышения квалификации, отправка сообщения на внутреннюю почту преподавателя.

N.V. ASTAPENKO, R.K. SHOTKIN

N.V. Astapenko

Senior Teacher, Magister, e-mail: astankin@mail.ru

R.K. Shotkin

Student, e-mail: astankin@mail.ru

North Kazakhstan State University n.a. M. Kozybayev, Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan

Abstract. The main idea of the project consists of creation of the web application "Professional development" for the account and management of the reporting documents connected with professional development of the faculty of higher education institution.

Keywords: web application, system of document flow, professional development.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ В ИНЖЕНЕРНОМ ДЕЛЕ

И.Е. Евдокимов

к.ф.-м.н., e-mail: i.evdokimov@rus-helicopters.com

НИЦ АО «Вертолёты России»

Аннотация. В статье проведён анализ различных работ в области прикладного компьютерного моделирования физических процессов. Основное внимание уделено вопросам моделирования газодинамических процессов, имеющих большую вычислительную ёмкость и требующих реализации сложных алгоритмов распределённых вычислений. На примерах двух задач расчёта течения в осевом компрессоре, поставленных в 2009 и 2013–2014 гг. в разных университетах ФРГ, показано почти трёхкратное увеличение ёмкости задачи, а также примерно 14-кратное увеличение задействованных вычислительных ресурсов. Отмечено, что задачи уровня научного университетского исследования 2009 гг. в настоящее время уже являются промышленными задачами, которые могут быть решены инженерами достаточно высокой квалификации с применением современных расчётных программ и промышленных кластеров. Помимо особых требований к квалификации инженеров-исследователей изменение инструментов и подходов к работе отделов информационного обеспечения также требует подготовки особых специалистов в области разработки прикладных программ для управления кластерами, администраторов вычислительных систем и разработчиков алгоритмов распределённых вычислений. Помимо вычислительных кластеров, которые уже стали традиционными компонентами любого исследования, связанного с компьютерным моделированием в любой научной области, в статье уделено внимание использованию графических ускорителей (GPU) и технологии CUDA для улучшения качества компьютерных моделей и снижения расходов на вычисления. Были рассмотрены результаты, опубликованные в различных работах в РФ и за рубежом, посвящённые разработке специальных решателей с использованием возможностей GPU. В частных случаях, разработчикам таких решателей удастся добиться значительных результатов в плане улучшения универсальности своих расчётных программ благодаря широкому использованию готовых библиотек и метапрограммированию.

Ключевые слова: высокопроизводительные вычислительные системы, кластеры, компьютерное моделирование, инженерный анализ.

Введение

Проектирование современной техники в наше время не может обойтись без применения разнообразных вычислительных средств. Несмотря на недостатки численных моделей, экспериментальные исследования продолжают сокращаться в общей доле исследований при внедрении новых изобретений и создании новых образцов технических устройств. Несмотря на отчётливую тенденцию к увеличению масштаба математических моделей, стоимость и энергозатратность компьютерного моделирования снижается, в то время как стоимость проведения и сложность эксперимента — растут.

Количество вводимых в строй суперкомпьютеров непрерывно возрастает. Современный инженер может иметь на рабочем месте компьютер, не мыслимый ещё 15–20 лет назад. В журнале *Innovative Supercomputing in Deutschland* [1] опубликован значительный список университетов Германии, оснащённых высокопроизводительными кластерными системами. Явными лидерами списка www.top500.org являются университеты США, однако, заметные места в нём занимают Китай, Япония, Германия, Франция и университеты других европейских стран, что является показателем развития науки и техники. В списке TOP500 фигурируют не только государственные институты, но и частные компании в сфере авиации, космонавтики, электроники и даже страховые компании.

Применение суперкомпьютеров в России встречает ряд системных проблем, прежде всего связанных с недостатком специалистов в различных областях: квалифицированных инженеров, умеющих пользоваться технологиями масштабируемых вычислений; системных администраторов, способных поддерживать кластеры на предприятиях и в университетах. Данные системные проблемы подпитывают стереотипы в отношении применения кластеров и суперкомпьютеров в научной и инженерной деятельности.

Образование специалистов в технической, инженерной области имеет слабую связь с технологиями высокопроизводительных вычислений. Данная тема либо не рассматривается в курсах информатики, либо не затрагивается в специализированных курсах преподавателями в силу отсутствия доступа к кластерным системам из учебного класса.

Определённый прогресс в данном направлении был достигнут в рамках программы «Университетский кластер» в отдельных вузах. Программа улучшила ситуацию с наличием вычислительных систем в учебных заведениях, однако, вопросы применения этих систем целиком и полностью зависят от локальных условий и личных качеств людей, которые занимаются проблемами образования в вузах, оснащённых суперкомпьютерами.

1. Современные инженерные задачи и суперкомпьютеры

Можно оценить динамику роста масштаба инженерных задач по ряду публикаций в специализированных журналах. Например, в журнале *inSeDe* за 2009 год [2] была опубликована статья «Numerical Investigation of a Highly

Loaded Axial Compressor Stage with Inlet Distortions». При проведении аэродинамического расчёта компрессора авиационного двигателя использовалась расчётная сетка количеством узлов более 50 миллионов. Стационарные и нестационарные вычисления производились на 130 процессорах, общее количество использованной памяти составило 495 Гб. С таким количеством процессоров была достигнута производительность 3000 итераций в день, всего расчёт проводился 6 месяцев для нестационарного расчёта, состоящего из 128 шагов по физическому времени. Для расчётов использовался суперкомпьютер Leibniz Computer Center in Garching.

В работе 2014 года «Numerical simulation of the rotating instability in an axial compressor stator», представленной на конференции СЕАА в г. Светлогорске [3] были изложены результаты по численному моделированию кругового срыва в компрессоре. Модель компрессора состояла из 188 элементарных объёмов, в данном случае проводился нестационарный расчёт, вычисления длились 40 дней на 1860 процессорах. Общий объём работы оценивался в 1,8 миллиона часов процессорного времени (Supercomputer HLRN-II of the North-German Supercomputing Alliance).

Изложенные примеры, безусловно, различаются по характеру. Очевидно, для данных работ осуществлялась различная по объёму поддержка исследований из различных фондов. Но можно с уверенностью сказать, что научная работа 2009 года по объёму вычислительных ресурсов примерно соответствует возможностям рядового промышленного кластера сегодня.

Bodo Reimann в презентации [4] приводит ряд задач из области космонавтики и характеризует их вычислительную сложность. Как правило, данные задачи имеют отношение к области вычислительной газовой динамики. Рассмотрим эти задачи:

1. Задача расчёта бафтинга основания ракеты Ariane 5: 12 миллионов узлов, >350000 CPUh для моделирования 100 ms реального физического времени.
2. Взаимодействие факелов двигателей в космосе: 2 миллиона ячеек, 80 миллионов частиц, 120 субдоменов ~35000 CPUh для 130000 шагов в методе Монте-Карло.

Как мы видим, задача моделирования ракетного двигателя по своему масштабу находится достаточно близко к задаче моделирования срыва в осевом компрессоре. При необходимости моделирования более длительного времени вычислительные сложности задач могут сравняться.

Повсеместно в практике инженерных расчётов наблюдается отход от эмпирических теорий. Факт имеет отношение к области вычислительной газовой динамики и связан с уменьшением использования моделей турбулентности, разработанных с 1940 по 2000 гг., имеющих значительные эмпирические основы в своих формулировках.

Возрастающая вычислительная сложность задач требует соблюдения многих требований к используемому оборудованию и программному обеспечению. Несмотря на возможное соблюдение закона масштабирования, реальная производительность системы может сильно страдать при неправильном обслужива-

нии операционной системы и оборудования. Постоянный контроль за состоянием вычислительного кластера становится насущной задачей для любой организации, которая его использует.

2. Вычисления на GPU. Тенденции в НРС для инженеров

За всё время развития технологии расчётов на графических процессорах, или GPU, в основе которых, прежде всего, лежит технология CUDA компании nVidia, накоплен большой опыт применения распределённых алгоритмов вычислений. Работы в области вычислительной газовой динамики на CUDA чаще имеют научный характер [5].

Это связано со сложностью проектирования вычислительного алгоритма и трудностью его реализации. Поэтому круг задач, решаемых на GPU в частных научно-исследовательских проектах, не велик.

Однако в последнее время наметились тенденции к созданию универсальных расчётных программ для численного моделирования с использованием CUDA. Одной из наиболее ярких является программа пермских разработчиков GHOST CFD [6]. Основные качества данной программы: использование методов высокого порядка для расчёта турбулентных течений, использование вихреразрешающих методов для описания турбулентности. Возможность моделирования акустических явлений в среде. В докладе на конференции СЕАА 2014 г. авторы продемонстрировали хорошую производительность разработанной программы при решении задачи расчёта шума вентилятора авиационного двигателя. Показатели производительности сравнивались с широко распространённым комплексом ANSYS CFX. В результате расчётов показано преимущество в суммарном времени расчёта на вычислительной системе, оснащённой GPU.

Повышенный интерес к созданию универсальных программ с применением специализированных процессоров GPU на Западе показывает создание и активная разработка программы pyFR (<http://www.pyfr.org>). Данный расчётный комплекс разрабатывается в Imperial College of London в том числе для концерна BAЕ. В целом он характеризуется аналогичным подходом: использованием методов высокого порядка для одновременного расчёта турбулентных течений и явлений аэроакустики вихреразрешающими методами для расчёта турбулентности. Планируется реализация сопряжённых методов расчёта (Fluid-Structure Interface) для совместного расчёта конструкция — обтекающая среда.

Существенные преимущества в производительности (десятки раз) показывают, что при сравнительной сложности расчётных моделей GPU обеспечивают меньшую ресурсоёмкость расчётов. Несмотря на то, что методы расчёта на GPU адаптируются для такого пакета как OpenFOAM, преимущества технологии зачастую реализуются в меньшем объёме, чем в случае разработки нового решателя специально для графических ускорителей. При этом опыт проекта pyFR уже показывает то, что специализированный код может быть небольшим — 5000 строк для уравнений Навье-Стокса в предположении сжимаемой среды. В то же время ускорение расчёта на GPU для OpenFOAM чаще всего

разрабатываются для несжимаемых решателей, и это связано с особенностями алгоритмов решателей для сжимаемой среды.

3. Общие выводы

Очевидно, в ближайшем будущем будет продолжена разработка специализированного программного обеспечения для расчётов на GPU, это связано с существенным приростом производительности данного вида систем по сравнению с процессорами общего назначения. Положительным фактом является то, что такие разработки как PyFR являются открытыми, что позволяет использовать уже имеющийся опыт и сконцентрироваться в получении нового знания и новых вычислительных методов.

Уже зарекомендовавшие себя программные пакеты OpenFOAM или гигант ANSYS, будут реализовывать свои собственные методы расчёта, использующие достоинства графических процессоров. Такой вариант развития событий уже наблюдается для открытого пакета OpenFOAM. Любой открытый проект может стать международным, а участвующие в нём университеты могут приобрести передовой опыт, обмениваясь друг с другом достижениями. Поэтому для улучшения качества подготовки специалистов со всех сторон важно встраиваться в систему международных проектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. inSiDE journal, Vol.11, No. 1, Autumn 2013.
2. inSiDE journal, Vol.7, No. 2, Autumn 2009.
3. Beselt Ch., Ehrenfried K., Miche U., Peitsch D., van Rennings R., Thiele F. Numerical simulation of the rotating instability in an axial compressor stator. CEAA Proceedings, 2014. URL: http://ceaa.imamod.ru/files/ceaa2014.pdfs/CEAA2014_3_1.2_Michel.pdf
4. Reimann B. HPC Aktivitäten der Abteilung Raumfahrzeuge — Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik. URL: <http://www.t-systems-sfr.com/e/downloads/2013/vortraege/7reimann.pdf>
5. URL: http://www.nvidia.com/object/computational_fluid_dynamics.html
6. Коромыслов Е.В., Усанин М.В., Гомзиков Л.Ю., Синер А.А. Расчёт инженерных газодинамических задач методами высокого порядка точности на графических процессорах // Альманах CUDA, июль 2014.

MODERN TRENDS IN HIGH PERFORMANCE COMPUTING IN ENGINEERING

I.E. Evdokimov

Ph.D. (Math.), e-mail: i.evdokimov@protonmail.ch

Center of Innovations and Competence JSC "Russian Helicopters"

Abstract. Modern approach to high performance computing is discussed in the article. It describes several large scale engineering and computational fluid dynamics problems which were solved from 2009 to present times at different universities all over the world. The growing interest for solving future engineering problems is in the using of the graphical processor units and the developing of the universal software for using in GPU systems.

Keywords: engineering, high performance computing.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НАУЧНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

В.С. Веденеев

ведущий спец-т по информационной безопасности (ОАО «ЧЦЗ»),
e-mail: ingafen@gmail.com

И.В. Бычков

д.ф.-м.н., профессор, e-mail: bychkov@csu.ru

Челябинский государственный университет

Аннотация. В работе рассмотрены особенности применения методологии экстремального программирования при разработке научного программного обеспечения.

Ключевые слова: экстремальное программирование, рефакторинг.

1. Экстремальное программирование

Экстремальное программирование — методология разработки программного обеспечения (далее — ПО), придуманная группой разработчиков (Кент Бек, Уорд Каннингем, Мартин Фаулер и др.). Применение этой методологии даёт возможность быстро разрабатывать бизнес-приложения, а также даёт большую гибкость при разработке в случае изменения условий заказчика. Экстремальное программирование ориентировано на работу в команде. При этом существует возможность разработки с применением этой методологии одним разработчиком.

Применение этой методологии даёт большое преимущество при разработке бизнес-приложений. Первое — применение разработки через тестирование (англ. Test Driven Development, далее — TDD) даёт не только некоторый уровень гарантии в качестве программного продукта (т.е. соответствия изначальным требованиям заказчика и полного соответствия замыслу разработчиков), но и даёт уверенность разработчиков в том, что новый функционал не будет вносить коррективы в базис разрабатываемой системы. Кроме того, при выявлении ошибок в разработке или неучтённых ситуаций TDD даёт уверенность в том, что ошибка не повторится вновь. Впоследствии, при длительной разработке больших систем применение TDD даёт большое преимущество в скорости разработки перед традиционными методологиями.

Кроме TDD в экстремальное программирование содержит ряд других практик [1]:

- Короткий цикл обратной связи (Fine scale feedback)

Игра в планирование (Planning game)

Заказчик всегда рядом (Whole team, Onsite customer)

Парное программирование (Pair programming)

- Непрерывный, а не пакетный процесс

Непрерывная интеграция (Continuous Integration)

Рефакторинг (Design Improvement, Refactor)

Частые небольшие релизы (Small Releases)

- Понимание, разделяемое всеми

Простота (Simple design)

Метафора системы (System metaphor)

Коллективное владение кодом (Collective code ownership) или выбранными шаблонами проектирования (Collective patterns ownership)

Стандарт кодирования (Coding standard or Coding conventions)

- Социальная защищенность программиста (Programmer welfare)

40-часовая рабочая неделя (Sustainable pace, Forty hour week)

При разработке командой из одного человека многие практики сливаются во едино. Решение о применении или неприменении той или иной практики остаётся на усмотрение разработчика.

При разработке одним человеком этот человек становится и разработчиком, и руководителем проекта. В случае разработки научных приложений он является ещё и заказчиком. Поэтому многие практики могут «мутировать» и изменяться.

По мнению автора, наиболее удобным набором практик в таком случае являются:

1. TDD и рефакторинг
2. Непрерывная интеграция
3. Простота
4. Метафора системы

Расшифруем каждый из терминов.

Рефакторинг — оптимизация кода программы с целью достижения простоты и читаемости кода и др. без изменения поведения программы [2]. Признаками кода, которые свидетельствуют о необходимости рефакторинга (т.н. «код с запашком»), являются следующие явления:

- дублирование кода;
- длинный метод;

- большой класс;
- длинный список параметров;
- «завистливые» функции — это метод, который чрезмерно обращается к данным другого объекта;
- избыточные временные переменные;
- классы данных;
- не сгруппированные данные

Каждый из вышеуказанных признаков свидетельствует о том, что код является неэффективным. Без модификации этот код может повлечь за собой ещё большее количество неоптимального кода, что в конечном итоге приводит к труднопонимаемому коду, который будет содержать трудно выявляемые ошибки. Методы рефакторинга позволяют оптимизировать программный код и исключать накопление ошибок.

Цикл операций при разработке с использованием TDD выглядит следующим образом:

1. Написание теста (описание будущего функционала)
2. Написание кода — «заглушки» для компиляции программы
3. Написание полного кода для того, чтобы выполнялись все тесты.
4. Рефакторинг.

Рефакторинг является неотъемлемой частью TDD. Одним из способов рефакторинга является рефакторинг с использованием шаблонов (паттернов). Шаблоны проектирования — это типовые приёмы программирования, позволяющие их использовать в большинстве операций при проектировании и разработке программного обеспечения [3].

2. S.O.L.I.D.

Также в приложениях могут быть использованы принципы объектно-ориентированного проектирования, называемые S.O.L.I.D., по первым буквам названий методов на английском языке. [4]

Single responsibility principles — принцип единственности ответственности подразумевает, что каждый класс должен выполнять только одну задачу (должна лежать только одна ответственность).

Open/closed principles — принцип закрытости/открытости подразумевает, что сущности должны быть открыты для расширения, но закрыты для изменений.

Liskov substitution principle — принцип Лисков означает, что сущность может быть заменена своими потомками (в рамках наследования) без изменения свойств программы.

Interface segregation principle — принцип разделения интерфейса означает, что различные частные интерфейсы являются более предпочтительными, чем один большой и всеобъемлющий интерфейс.

Dependency inversion principle — принцип инверсии зависимостей подразумевает следующее:

1. Модули верхнего уровня не должны зависеть от модулей нижнего уровня. Оба должны зависеть от абстракции.
2. Абстракции не должны зависеть от деталей. Детали должны зависеть от абстракций.

3. Ограничения методологий при разработке научного программного обеспечения

Несмотря на все преимущества перечисленных выше методологий при разработке научно-исследовательского ПО существует ряд условий, ограничивающих применение указанных выше методик.

Одним из условий применения TDD является точный результат, который должен быть получен в итоге. В случае бизнес-систем результат будет предсказуемым: бизнес-процессы максимально детерминированы для исключения рискованных ситуаций. При выполнении научных вычислений результат заранее неизвестен. Поэтому при использовании TDD часть интеграционных тестов состоит в том, чтобы проверить, сходится ли алгоритм: ограничены ли каким-нибудь конечным значением его результаты.

Вторым способом проверки является проверка на отсутствие запрещённых состояний (к примеру, результаты работы алгоритма должны быть неотрицательными и др.).

Третьим способом проверки является наличие «типовых значений», т.е. конкретные решения либо заранее известные результаты работы алгоритма при определённых входных значениях.

В случае, если алгоритм разбивается на блоки, то с помощью TDD можно проверить каждую из частей алгоритма. Это позволяет выявить «арифметические» ошибки при написании кода. Подобные тесты помогут выявить правильный порядок арифметических выражений, выявить, к примеру, использование сложения вместо вычитания, что возможно при написании больших участков кода, над которыми невозможно провести рефакторинг.

Тесты помогают проверить инфраструктуру, окружающую исследуемый алгоритм: корректность подготовки входных данных, обработки полученных результатов, операции импорта и экспорта данных.

В связи с этим использование TDD, несмотря на кажущуюся избыточность, позволяет максимально исключить неопределённость при исследовании какого-

либо явления или алгоритма и целиком сосредоточиться на исследовании проблемы. Применение методологий гибкой разработки также содержит кажущуюся, на первый взгляд, избыточность, однако, на этапе исследований позволяют быстро переключать акценты и направления исследований без переработки больших участков кода.

Зачастую пробы изменения входных данных, коэффициентов, отдельных блоков обработки данных для получения определённых результатов и есть важная составляющая научной работы. В случае неадекватных результатов система контроля версий позволит быстро вернуться к предыдущему этапу разработки.

4. Заключение

Использование методов экстремального программирования при разработке научного ПО позволяет быстро пробовать и применять новые идеи и методы. Это позволяет в достаточно сжатые сроки проверять научные предположения, возникающие при изучении той или иной проблемы. Несмотря на кажущуюся избыточность, методы экстремального программирования позволяют сохранить гибкость системы при её росте, что впоследствии позволяет избежать коллапса и необходимости разработки системы заново.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бек К. Экстремальное программирование. Питер, 2002. С. 79–90.
2. Фаулер М. Рефакторинг: улучшение существующего кода. СПб: Символ-Плюс, 2003.
3. Кириевски Д. Рефакторинг с использованием шаблонов. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2006. с. 400.
4. Мартин Р., Мартин М. Принципы, паттерны и методики гибкой разработки на языке С#. СПб: Символ-Плюс, 2011. с. 768.

THE USE OF EXTREME PROGRAMMING IN THE DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC APPLICATIONS

V.S. Vedeneev

Postgraduate, e-mail: ingafen@gmail.com

I.V. Byichkov

Doctor of Physico-Mathematical Science, Prof., e-mail: bychkov@csu.ru

Chelyabinsk State University

Abstract. The usage of extreme programming in development of scientific software is described in this work.

Keywords: extreme programming, refactoring.

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ТЕХНОЛОГИЙ

С.Н. Верзунов

ст. преподаватель каф. ИВТ, аспирант, e-mail: abalckin@hotmail.com

Н.М. Лыченко

д.т.н., проф. кафедры ИВТ, e-mail: nlychenko@mail.ru

Кыргызско-Российский славянский университет, г. Бишкек

Аннотация. Разработаны методика и программные средства для анализа геомагнитных вариаций на базе вейвлет-преобразования. На примере анализа магнитных вариаций показана эффективность разработанной методики. В частности было выяснено, что для периода магнитных бурь характерно появление квазипериодических вариаций магнитного поля с периодами в 120 и 30 мин. Программные средства разработаны на языке Python 3, являются кроссплатформенными и имеют широкий функционал.

Ключевые слова: вейвлет-преобразование, цифровая обработка нестационарных неравномерных временных рядов, анализ геомагнитных вариаций, программные средства.

1. Предмет и задачи разработки

Изучению вариаций геомагнитного поля Земли посвящено множество работ, при этом в основном для анализа измерительной информации традиционно использовался аппарат Фурье-преобразования. Однако в силу явной нестационарности магнитовариационного сигнала Фурье-анализ не способен дать достаточно полной информации о сигналах. Учесть особенности нестационарных временных рядов возможно, используя вейвлет-технологии, применению которых в анализе геомагнитных данных в последнее время посвящено значительное количество работ [1, 2, 3].

Недостаток предложенных в настоящее время методик анализа временных рядов заключается в том, что они не учитывают особенностей магнитовариационных данных — достаточно большой размерности (порядка 2^{16} в типичном случае) и наличия пропусков, возникающих вследствие сбоев применяемого оборудования, а также помех в каналах передачи данных. В отличие от методов, предложенных в работах [2, 4], в настоящей работе предлагается использовать интерполяцию для заполнения небольших пропусков, всегда имеющих в реальных данных такого рода, и Фурье-анализ (БПФ), поскольку он эффективен при исследовании данных большой размерности. В методе, предложенном в работе [1], для анализа магнитных вариаций используется дискретное

вейвлет-преобразование, которое позволяет анализировать сигнал только по масштабам и сдвигам, равным степени двойки. Однако для магнитовариационного сигнала непрерывное вейвлет-преобразование более удобно; его некоторая избыточность, связанная с непрерывным изменением масштабного коэффициента и параметра сдвига, является при этом положительным качеством, так как позволяет более полно и чётко представить и проанализировать содержащуюся в данных информацию, поэтому в настоящей работе предложено использовать непрерывное вейвлет-преобразование.

Цель данной работы — разработать алгоритм и программные средства для анализа геомагнитных вариаций на основе вейвлет-преобразования, позволяющие сделать цифровую обработку временных рядов геофизических данных доступной широкому кругу учёных, занимающихся анализом вариаций магнитного поля Земли. Разработанная автоматизированная система предназначена, в первую очередь, для просмотра и вейвлет-анализа вариаций одной из составляющих геомагнитного поля, однако, она может быть использована для анализа любых одномерных данных, представленных в формате CSV (Comma Separated Value — значения, разделённые запятой). В качестве исходных данных для отладки и иллюстрации работы автоматизированной системы использованы данные интерактивного ресурса по солнечно-земной физике (Space Physics Interactive Data Resource, SPIDR). Разработанный алгоритм анализа геомагнитных вариаций включает два этапа: предобработка измерительной информации (интерполирование, исключение тренда) и собственно анализ на основе Фурье и (или) вейвлет-преобразований.

2. Разработка алгоритма анализа геомагнитных данных

2.1. Данные для анализа

Как было сказано выше, данные для анализа предоставляет интерактивный ресурс по солнечно-земной физике (Space Physics Interactive Data Resource, SPIDR, <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr>), который проектировался как распределённая сеть синхронных баз данных, позволяющая получать, визуализировать и моделировать данные по космической погоде при помощи сети Интернет. В рассматриваемой автоматизированной системе пользователь может сделать запрос на сервер SPIDR, выбрав интервал времени, необходимые данные и список станций или спутников (параметры данных). Заполненные формы обрабатываются на сервере при помощи Java-сервлетов, которые распределяют запросы на серверы базы данных, сервер посылает результат пользователю [6]. На рис. 1 показана запись модуля вектора магнитных вариаций с минутным осреднением из обсерватории Новосибирск в период мощной магнитной бури 20 ноября 2003 года, полученная путём запроса к базе данных SPIDR.

2.2. Интерполяция исходных данных

Так как исходные данные (временной ряд) вследствие несовершенства используемой аппаратуры и каналов передачи данных содержат пропуски, необхо-

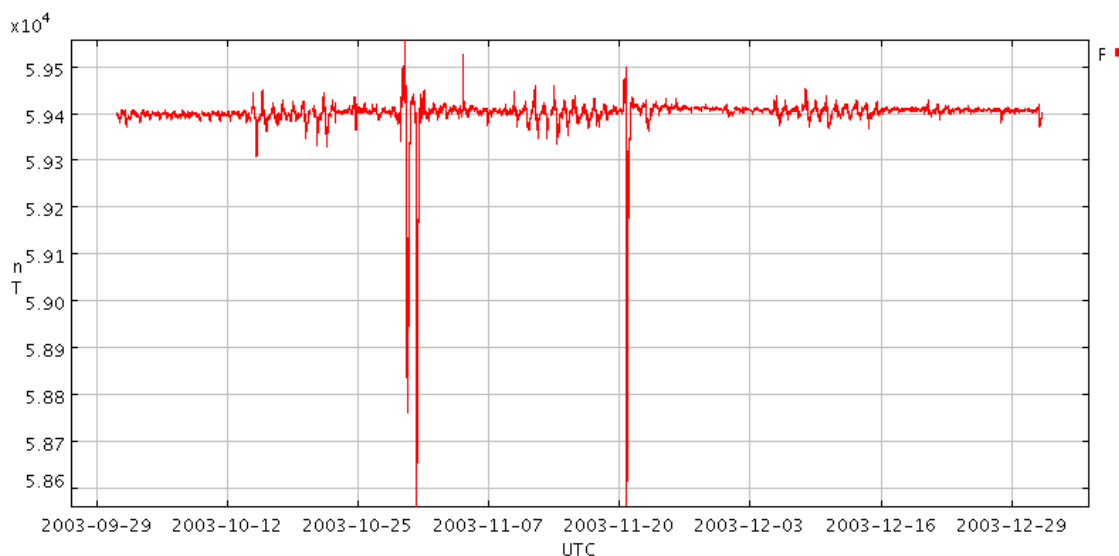


Рис. 1. Исходные данные — вариации модуля вектора напряженности геомагнитного поля в период с октября по декабрь 2003 года, записанные на станции Новосибирск. По оси абсцисс отложены данные; по оси ординат — напряженность, нТ (http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/servlet/ImageServlet?width=800&height=400&representation=UNDEF&elem=F,1,Geom,NVS_min&dateFrom=20031001&dateTo=20031231)

дима их интерполяция. По графику исходного ряда видно, что характеристики сигнала не остаются постоянными, изменяется его форма, частота и амплитуда. В связи с этим для аппроксимации ряда $f_n = f(t_n)$, заданного в моменты $t_0, t_1, \dots, t_n$ значениями $f_0, f_1, \dots, f_n$, используется функция $\varphi(t_n)$ (кубический сплайн), определённая на интервале $t \in [t_{i-1}, t_j]$ как

$$\varphi_i(t) = a_i + b_i(t - t_{i-1}) + c_i(t - t_{i-1})^2 + d_i(t - t_{i-1})^3, \quad (1)$$

где a_i, b_i, c_i, d_i — коэффициенты сплайна, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ — номер сплайна.

Коэффициенты сплайна находятся по методу подгонки, подробно описанному в работе [6]. Согласно этому методу коэффициент $a_i = f_{i-1}$, коэффициент $b_i = (f_i - f_{i-1})/h_i(c_{i+1} + 2c_i)h_i/3$, где $h_i = t_i - t_{i-1}$, $1 \leq i \leq n$, $d_i = (c_{i+1} - c_i)/(3h_i)$. То есть остальные коэффициенты выражаются через коэффициент c_i , а сам он находится по формуле:

$$c_i = k_i - I_i c_{i+1}, \quad (2)$$

где I_i, k_i — специальные подгоночные коэффициенты, которые определяются соотношениями:

$$k_i = \frac{r_i - h_{i-1}k_{i-1}}{s_i - h_{i-1}h_{i-1}}, \quad I_i = \frac{h_i}{s_i - h_{i-1}I_{i-1}}, \quad (3)$$

где $s_i = 2(h_{i-1} - h_i)$, при этом $k_1 = 0, I_1 = 0$.

В процессе выполнения прямого хода метода подгонки вычисляются все подгоночные коэффициенты I_i, k_i по рекуррентному соотношению (3). Далее последовательно применяется формула (2), которая позволяет найти значения

всех коэффициентов c_i , зная которые легко вычислить все остальные коэффициенты сплайнов.

После этого интерполирующую функцию можно рассчитать с помощью соотношения (1) в любой момент t на интервале $[t_0, t_n]$. После интерполяции временной ряд задан значениями функции, следующими друг за другом с постоянным шагом Δt :

$$f_k = f(t_k), t_k = k\Delta t, k = 0, 1, \dots, N - 1. \quad (4)$$

2.3. Исключение линейного тренда

В настоящем алгоритме обработки предлагается использовать как вейвлет-, так и Фурье- преобразование, поскольку для некоторых интервалов временных рядов Фурье-анализ также вполне информативен. Поэтому, т.к. преобразование Фурье очень чувствительно к линейному тренду, а вейвлеты первого порядка не менее чувствительны, его необходимо исключить. Это можно сделать путём замены исходных значений ряда (4) первыми последовательными разностями.

Пусть $\bar{y}_t = y_t + \varepsilon_t$; $\bar{y}_t = a + bt$, где ε_t ; — отклонение от тренда.

Тогда $\Delta_t = y_t - y_{t-1} = a + bt + \varepsilon_t - (a + b(t-1) + \varepsilon_{t-1}) = b + (\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1})$.

Коэффициент b — константа, которая не зависит от времени. При наличии линейной тенденции остатки ε_t достаточно малы и носят случайный характер. Поэтому первые разности уровней ряда Δ_t не зависят от переменной времени, их можно использовать для дальнейшего анализа.

Коэффициент b — среднее значение ряда определяется по формуле:

$$b = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \Delta_t,$$

тогда центрированный ряд определяется: $x_t = \Delta_t - b$.

На рис. 2б показан центрированный и освобождённый от линейного тренда ряд. Однако так как линейный тренд очень мал, результат будет заметен только при внимательном сравнении периодограмм в области низких частот.

2.4. Построение периодограммы

Периодограмма вычисляется с использованием быстрого преобразования Фурье сигнала x длиной N по формуле:

$$X_m = \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n} a_{N/2}^{nm} + e^{-\frac{2\pi i}{N} m} \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n+1} a_{N/2}^{nm}, m = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (5)$$

при помощи алгоритма Кули-Тьюки [7]. После нахождения преобразования Фурье (5) периодограмма вычисляется следующим образом:

$$D_j = \frac{1}{N^2} [(\operatorname{Re} X_j)^2 + (\operatorname{Im} X_j)^2], j = 0, 1, \dots, N/2$$

Таблица 1. Часто употребляемые вейвлет-базисы

Название вейвлет-базиса	Определение	Фурье-образ
DOG (derivative of a Gaussian — производная функции Гаусса)	$\psi_m(t) = (-1)^m \partial_t^m \left[e^{-\frac{t^2}{2}} \right]$, где $\partial_t^m = \partial^m [\dots] / \partial t^m, m \geq 1$	$\widehat{\psi}_m(k) = m(ik)^m e^{-\frac{k^2}{2}}$
Морли	$\psi(t) = e^{ik_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}}$	$\widehat{\psi}(k) = \Theta(k) e^{-\frac{(k-k_0)^2}{2}}$, где $\Theta(k)$ — функция Хевисайда
Пауля	$\psi(t) = (m+1) \frac{i^m}{(1-it)^{m+1}}$	$\widehat{\psi}(k) = \Theta(k) k^m e^{-k}$

При нечётном N вычисления продолжают до $N/2 + 0,5$. Отсчёты периодограммы соответствуют частотам $\nu_j = \Delta\nu j, j = 0, 1, \dots, N/2$, где $\Delta\nu = \frac{1}{N\Delta t}$

2.5. Построение скалограммы

Для вычисления вейвлет-преобразования можно воспользоваться формулой:

$$W(a, b) = \frac{1}{n(a, b)} \sum_{k=0}^{N-1} f_k(t) \psi^* \left(\frac{t_k - b}{a} \right),$$

где

$$n(a, b) = \sum_{k=0}^{N-1} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t_k - b}{a} \right)^2}.$$

Вейвлет-функция (6) вычисляется для значений аргументов a_i и b_i , где $i = 0, 1, \dots, N_a - 1$; $b = 0, 1, \dots, N_b - 1$ [8]. Используя (6), теперь можно ввести оценку локального спектра энергии — скалограмму [9]:

$$S(a_i, b_j) = |W_A(a_i, b_j)|^2.$$

Параметр a — масштаб, он определяет размер вейвлета. Параметр b — сдвиг, он задаёт временную локализацию вейвлета, а символом $*$ обозначена процедура комплексного сопряжения материнской (базисной) вейвлет-функции. В табл. 1 приведены наиболее часто употребляемые вейвлет-базисы [10].

Выбор функции $\psi(t)$, базисного вейвлета, как правило, определяется тем, какую информацию необходимо извлечь из сигнала. Каждый вейвлет имеет характерные особенности во временном и в частотном пространстве, поэтому иногда с помощью разных вейвлетов можно полнее выявить и подчеркнуть те или иные свойства анализируемого сигнала. Например, МНАТ-вейвлет (Mexican

hat — «Мексиканская шляпа»), получается из DOG при $m = 2$. Он имеет узкий энергетический спектр и два равных нулю момента, хорошо приспособлен для анализа сложных сигналов, так как коэффициенты $W(a, b)$ зависят от малого интервала области частот вейвлета [11].

Другим часто применяемым базисом является вейвлет Пауля. Чем больше m , тем больше нулевых моментов имеет этот вейвлет. Вейвлет Морли представляет собой плоскую волну, модулированную гауссианом единичной ширины. С увеличением k_0 возрастает частотная избирательность базиса, но ухудшается временное разрешение вейвлет-преобразования. На рис. 2г, е показаны скалограммы, выполненные вейвлетом Морле в разных диапазонах частот при $k_0 = 5$. Необходимо отметить также, что у вейвлета Морле равен нулю только нулевой момент, поэтому он чувствителен к линейному тренду. Также своими особенностями обладает вейвлет Хаара.

В разработанной автоматизированной системе исследователю предоставляется возможность выбора любого из описанных базисных вейвлетов.

2.6. Построение скейлограммы

Оценка глобального спектра энергии иллюстрируется построением скейлограммы

$$G(a_i) = \frac{1}{N'} \sum_j S(a_i, b_j),$$

где N' — число точек, по которому осуществляется осреднение [10]. Скейлограмма является прямым аналогом сглаженной периодограммы в Фурье-анализе.

2.7. Построение вейвлет-скелета

Широкие контуры линий близких по частоте на рис. 2г мешают проследить за эволюцией их частот во времени. Чтобы нивелировать влияние контуров, необходимо построить вейвлет-скелет (скелетон), выделив те точки скалограммы, в которых она имеет максимумы по масштабу a и сдвигу b [1]:

$$Sc(a_i, b_j) = \begin{cases} S_{ij}, & \text{если } S_{i-1,j} < S_{i,j} > S_{i+1,j} \text{ или} \\ S_{ij}, & \text{если } S_{i,j-1} < S_{i,j} > S_{i,j+1}, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (6)$$

где $S_{ij} = S(a_i, b_j)$. На скелетонах рис. 3 хорошо заметно различие между периодическими компонентами сигнала, идущими параллельно оси времени (3а) и случайными, идущими параллельно оси периодов (3б).

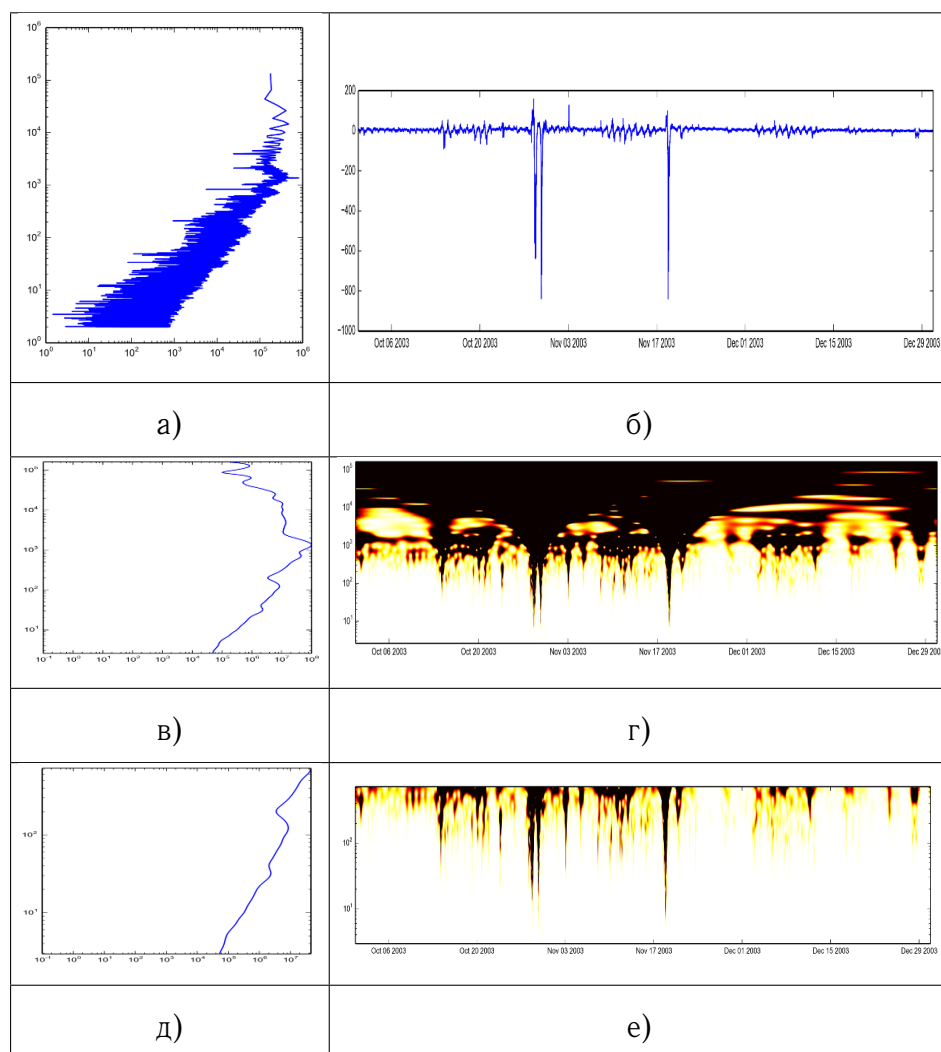


Рис. 2. Скейлограмма а) и скалограмма б), выполненная вейвлетом Морле во всем возможном диапазоне частот; скейлограмма в) и скалограмма г) в диапазоне частот до 700 мин.; периодограмма д) центрированного и освобожденного от линейного тренда е)

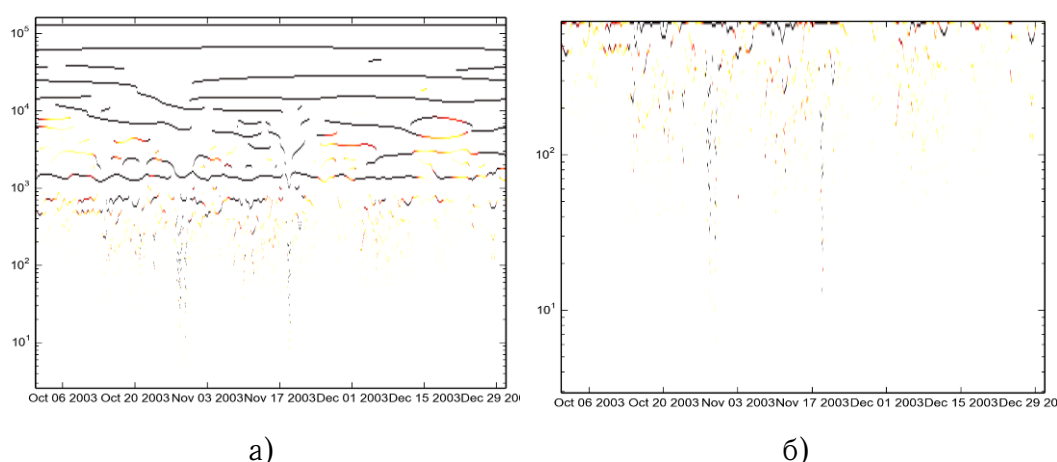


Рис. 3. Скелетон, полученный при помощи вейвлета Морле во всем возможном диапазоне периодов а) и в диапазоне до 700 часов б)

3. Блок-схема алгоритма анализа геомагнитных данных

Как следует из вышеизложенного, алгоритм анализа геомагнитных вариаций на основе вейвлет-технологий можно представить в виде следующей диаграммы деятельности (Activity Diagramm), выполненной в среде UML-моделирования Umbrello UML Modeller (<https://umbrello.kde.org/>) (рис. 4).

Для того чтобы начать анализ, пользователь должен задать параметры данных — временной интервал, компоненту вектора напряжённости магнитного поля, название станции, интервал дискретизации и (или) имя файла. В поле эти данные автоматически загружаются из хранилища SPIDR или сразу импортируются из файла по желанию пользователя. Для хранения данных используется файл в формате CSV, что позволяет анализировать не только магнитовариационные данные, но и любые другие одномерные временные ряды, единственным условием является соблюдение требований формата CSV. Следующий шаг — интерполяция данных и построение графика интерполированного временного ряда. На основании полученного графика пользователь должен принять решение, содержит ли исследуемый сигнал линейный тренд, и в этом случае дать команду системе исключить его. Необходимым этапом анализа является построение скалограммы. Она даёт возможность оценить степень нестационарности сигнала. В случае если на исследуемом участке характеристики сигнала (амплитуда, период) остаются приблизительно постоянными, то для его анализа достаточно построить периодограмму, она должна отражать все значимые особенности сигнала. В противном случае требуется построение скейлограммы, которая даёт возможность определить, содержит ли сигнал близкие по частоте компоненты, что говорит о необходимости построения вейвлет-скелета. Некоторые исследователи полагают, что скелетон не только чётко и без лишних деталей визуализирует структуру анализируемого сигнала, но и содержит всю информацию о нем [11]. Однако если вейвлет-скелет не по-

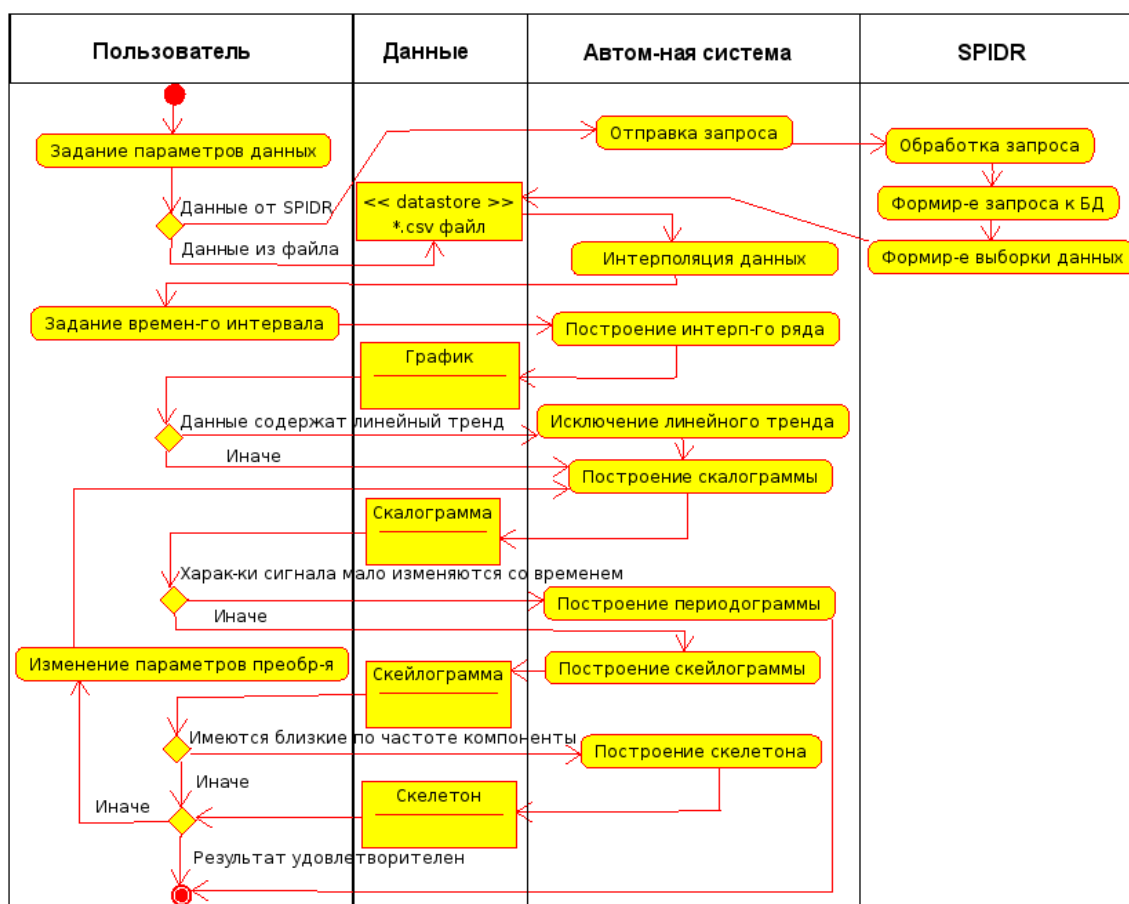


Рис. 4. Алгоритм анализа геомагнитных вариаций на основе вейвлет-технологий

казывает нужной информации, это означает, что требуется изменить параметры вейвлет-преобразования — тип или порядок вейвлета, а, возможно, и диапазон исследуемых частот. Эта возможность также поддерживается алгоритмом.

Таким образом, процесс анализа полностью контролируется пользователем, он управляет всеми значимыми параметрами, от которых зависит результат работы системы, которая, в свою очередь, берет на себя наиболее трудоёмкие и рутинные операции — загрузку данных, построение периодограммы, скелетона и другие.

4. Общая структура автоматизированной системы

Программная часть автоматизированной системы написана на языке Python 3 и использует следующие внешние компоненты без изменения исходного кода (рис. 5). Numpy — реализует численные алгоритмы и работу с матрицами. Scipy — библиотека научных алгоритмов для Python, из этого модуля импортируются функция исключения линейного тренда и гамма-функция для вейвлет-базиса Пауля. Matplotlib 1.3 используется для построения графиков. Qt 4.8 применяется для построения графического интерфейса пользователя.

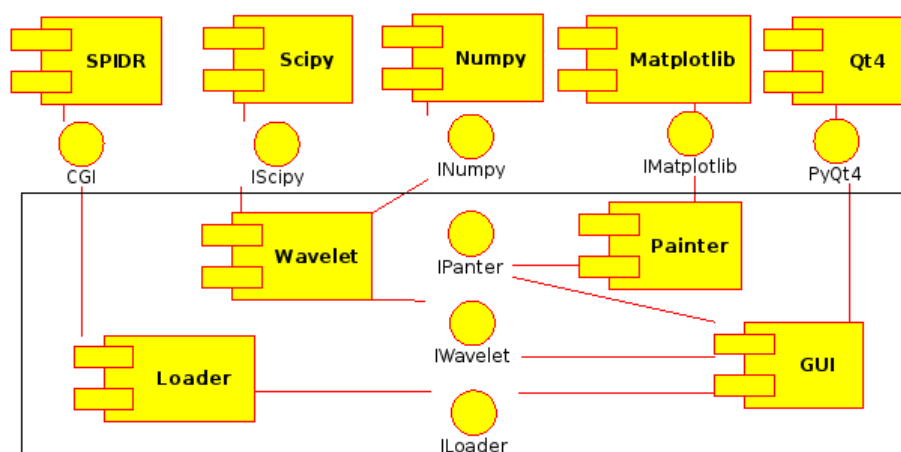


Рис. 5. Структура автоматизированной системы

(GUI — Graphic User Interface) версии 4.8, так на момент написания программы версия Matplotlib 1.3 не поддерживает Qt 5 версии. PyQt — обеспечивает интерфейс для использования Qt 4 совместно с языком Python. Все эти модули поставляются с исходным кодом по той или иной свободной лицензии и доступны для использования в научных и коммерческих проектах.

Для упрощения разработки и сопровождения код программы разбит на несколько логических модулей. GUI — содержит формы и классы, отвечающие за построение графического интерфейса пользователя. Wavelet — компонент, содержащий вейвлеты, и класс, необходимый для выполнения непрерывного вейвлет-преобразования. Модуль Painter — отвечает за построение скалограммы, скейлограммы и периодограммы. Loader — содержит классы, необходимые для загрузки данных из сети Интернет и импорта их в программу. Этот компонент по интерфейсу CGI (Common Gateway Interface — общий интерфейс шлюза) связывается с ресурсом SPIDR, о котором подробно рассказано выше.

Отличительными особенностями программных средств является достаточно широкий набор базовых вейвлетов и регулируемых параметров преобразования, графический интерфейс пользователя, кроссплатформенность (благодаря использованию интерпретатора языка Python программные средства могут работать под управлением широкого круга операционных систем, не требуя при этом установки таких тяжеловесных и требующих приобретения лицензии сред, как, например, Matlab). Все функции, выполняющие длительные математические расчёты, выполняются в фоновом режиме и отделены от интерфейса пользователя, что позволило достичь хорошей отзывчивости пользовательского интерфейса.

5. Обсуждение результатов анализа

При помощи описанной выше автоматизированной системы анализа геомагнитных вариаций на основе вейвлет-технологий был исследован временной ряд полного вектора напряжённости магнитного поля в период значительных

магнитных возмущений октября-ноября 2003 года по данным обсерватории Новосибирск (рис.1). В периодограмме (рис. 2а) ряда, освобождённого от линейного тренда (рис. 2б), можно видеть 4 значимые концентрации мощности с периодами 1440, 720, 120 и 30 минут. Периодограмма сильно изрезана, что свидетельствует о значительной стохастичности, присущей процессу геомагнитной активности. Спектральная полоса с периодом 1440 мин. (24 ч) — так называемая суточная вариация, является следствием вращения Земли вокруг своей оси. Вариация с периодом в 720 мин. называется лунной и возникает из-за приливного действия Луны. Причина остальных двух вариаций лежит в солнечно-земных взаимодействиях, однако, их природа и механизм возникновения до конца еще не известны. Кроме того, используя только периодограмму, невозможно выяснить, какие из этих вариаций характерны для периода магнитной бури, а какие проявляются и в магнитоспокойные дни. Следовательно, в алгоритме анализа геомагнитных вариаций оправдано использование вейвлет преобразования.

Из рис. 2г, е видно, что суточные и лунные вариации остаются постоянными. В небольших пределах изменяется их амплитуда. Напротив, 30 и 120-минутные вариации наблюдаются преимущественно в магнитовозмущенные дни, причем 30-минутные пульсации наблюдаются только во время значительных магнитных бурь, например, таких как 23 октября и 20 ноября 2003 года.

Заключение

Таким образом, адекватность и эффективность разработанных методики и программных средств показана на примере анализа магнитных вариаций в октябре-ноябре 2003 года. В частности, было выяснено, что для периода магнитных бурь характерны появления квазипериодических вариаций магнитного поля с периодами в 120 и 30 мин.

Разработанная автоматизированная система предназначена, в первую очередь, для просмотра и анализа вариаций одной из составляющих геомагнитного поля. Однако она может быть использована для исследования любых одномерных данных, представленных в формате CSV. Процесс анализа полностью контролируется пользователем, он управляет всеми значимыми параметрами, от которых зависит результат работы системы, которая, в свою очередь, берет на себя наиболее трудоёмкие и рутинные операции — загрузку данных, построение периодограммы, скелетона и другие. Отличительными особенностями разработанных программных средств, доступных по адресу <https://github.com/abalckin/tesla>, является достаточно широкий набор базовых вейвлетов и регулируемых параметров преобразования, графический интерфейс пользователя, кроссплатформенность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мандрикова О.В., Смирнов С.Э., Соловьев И.С. Метод определения Индекса геомагнитной активности на основе вейвлет-пакетов // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Том 52, № 1.
2. Иванов В.В. Вейвлет-анализ как инструмент анализа геомагнитных вариаций: теоретические основы и экспериментальные результаты // Доклады научной конференции Базы данных, инструменты и информационные основы полярных геофизических исследований. URL: www.izmiran.ru/polar2012/abstracts/tez_ivanovvv.doc
3. Мандрикова О.В., Соловьев И.С. Вейвлет-технология анализа вариаций геомагнитного поля // Доклады 13-й Международной конференции Обработка и передача измерительной информации. URL: www.autex.spb.su/dspa/dspa2011/dspa2011-6-2.doc
4. Витязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов: Учеб.пособие. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001.
5. Web Services Guide. REST API v1, v2 Space Physics Interactive Data Resource. URL: <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/docs/SPIDR.REST.WSGuide.en.pdf> (Version 3.0, May 2010).
6. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. Томск: МП «РАСКО», 1991.
7. Cooley, James W., John W.T. "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series". Math. Comput. 1965. 19: 297–301.
8. Foster G. Wavelets for period analysis of unevenly sampled time series // Astron. J. Vol. 112, N. 4 P. P. 1709–1729.
9. Scargle J.D. Wavelet and Other Multi-resolution methods for Time Series Analysis. Statistical Challenges in Modern Astronomy II / Ed GJ. Babu and E.D. Ferigelson. N.Y. Springer-Verlag. P. 333–347.
10. A Practical Guide to Wavelet Analysis Christopher Torrence, Gilbert P. Compo. Amer. Meteor. Soc. / In Bulletin of the American Meteorological Society. Vol. 79, No. 1. (1 January 1998).
11. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. Ноябрь 1996. Том 166, № 11,

DEVELOPMENT OF AUTOMATED SYSTEM FOR ANALYSIS GEOMAGNETIC VARIATIONS BASED ON WAVELET-TECHNOLOGIES

S.N. Verzunov

Senior Teacher, postgraduate, e-mail: abalckin@hotmail.com

N.M. Lychenko

Doctor of Technical Sciences, e-mail: nlychenko@mail.ru

Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek

Abstract. The methods and software tools for the analysis of geomagnetic variations on the basis of wavelet transform are developed. An analysis of magnetic variations demonstrated the efficacy of the developed technique. In particular, it was found that for the period of magnetic storms the appearance of quasi-periodic magnetic field variations with periods of 120 and 30 min is typical. Software tools are developed in Python 3, they are cross-platform and have a wide functional.

Keywords: wavelet transform, digital processing of non-stationary non-uniform time-series, analysis of geomagnetic variations, software.

ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ЯЗЫК ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

А.Ю. Воробьёв

аспирант, e-mail: flyenj@gmail.com

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского

Аннотация. В данной статье обсуждается возможность применения предметно-ориентированного языка программирования для быстрой и эффективной разработки программного обеспечения для автоматизированного контроля параметров электронных устройств, например, радиоприёмных устройств. Предполагается, что для такой проверки необходимо управлять несколькими устройствами: анализаторами, генераторами и т. д. Рассмотрено применение гипотетического внутреннего DSL (Domain Specific Language, DSL). Внутренний DSL — это один из способов использования языка общего назначения. Код во внутреннем DSL — это валидный код в языке общего назначения, но использующий только некоторое подмножество возможностей [1]. Предлагается использовать объектно-функциональный язык общего назначения Scala [2]. Благодаря использованию такого гипотетического DSL при разработке ПО для автоматизированного контроля параметров изделий разработчик может сосредоточиться только на бизнес-логике приложения, что позволяет разрабатывать ПО значительно быстрее и эффективнее. Такой результат достигается за счёт сокращения количества кода, необходимого для написания ПО, и уменьшения сложности разработки благодаря тому, что DSL внутренний и содержит готовые абстракции для решения часто встречающихся задач.

Ключевые слова: программирование, предметно-ориентированные языки, технологическое ПО, автоматизация, автоматизированный контроль параметров.

В настоящее время в сообществе разработчиков программного обеспечения (ПО) возрастает интерес к реализации предметно-ориентированных языков (Domain Specific Language, DSL) программирования для решения узкоспециализированных задач. DSL — это язык программирования с ограниченной выразительностью, специализированный для конкретной области применения [1]. Преимущества использования DSL заключаются в существенном снижении денежных и временных затрат на разработку. В некоторых случаях, благодаря снижению сложности, разрабатывать ПО могут люди, поверхностно знающие программирование.

На предприятиях-производителях различной электроники и радиоаппаратуры разработана система качества выпускаемой продукции. Контроль могут проходить все изделия и комплектующие, поступающие в производство. Для снижения себестоимости продукции, а также сокращения времени на поверку, предприятия данного типа самостоятельно разрабатывают и применяют ПО для автоматизированного контроля параметров выпускаемых изделий. В связи с активной разработкой новых изделий и модификацией существующих остро стоит задача существенного повышения эффективности разработки ПО технической диагностики изделий.

Ниже будет рассмотрено применение гипотетического внутреннего DSL. Внутренний DSL — это один из способов использования языка общего назначения. Код во внутреннем DSL — это валидный код в языке общего назначения, но использующий только некоторое подмножество возможностей [1]. В данном случае будет использован объектно-функциональный язык общего назначения Scala [2]. К преимуществам этого языка для создания DSL относятся [2]:

- строгая статическая типизация, благодаря чему DSL будет типобезопасен;
- функции высшего порядка, которые могут быть присвоены, переданы как аргумент и возвращены;
- выводение типов минимизирует необходимость для явного указания типов;
- краткий синтаксис;
- неявные конвертации (implicit), позволяющие неявно передавать аргументы функции;
- макросы [3].

Благодаря таким возможностям язык Scala хорошо подходит для решения поставленной задачи.

Ниже будет приведён пример гипотетического DSL на Scala для разработки ПО автоматизированного контроля параметров радиоприёмного изделия. Стоит отметить, что такой DSL подойдёт для аналогичных изделий и рабочих мест.

Рассмотрим радиоприёмное изделие с выходом сигналов в аналоговой форме. Для проверки такого устройства необходимо анализировать сигнал анализатором спектра, а также генерировать на антенный вход изделия чистый сигнал генератором сигнала. Стоит отметить, что современные анализаторы спектра и генераторы сигнала обычно имеют интерфейсы для удалённого управления по Ethernet или USB. Такое рабочее место изображено на рис. 1.

При разработке ПО для контроля параметров такого изделия необходимо, прежде всего, создать классы для взаимодействия с устройствами. Исходный код таких классов можно разделить на две составляющие. Первая содержит команды и запросы из протокола сопряжения устройства, логику их отправки и обработку ошибок. А вторая — код, не относящийся к бизнес-логике, например, открытие и закрытие сокетов, процедура соединения, проверка доступности устройства и т.д. Код из второй составляющей обычно частично переносят в отдельную программную библиотеку. Время разработки при этом сокращается, но не избавляет разработчика от необходимости реализовывать методы для каждой команды, а также знать и уметь применять API этой библиотеки.

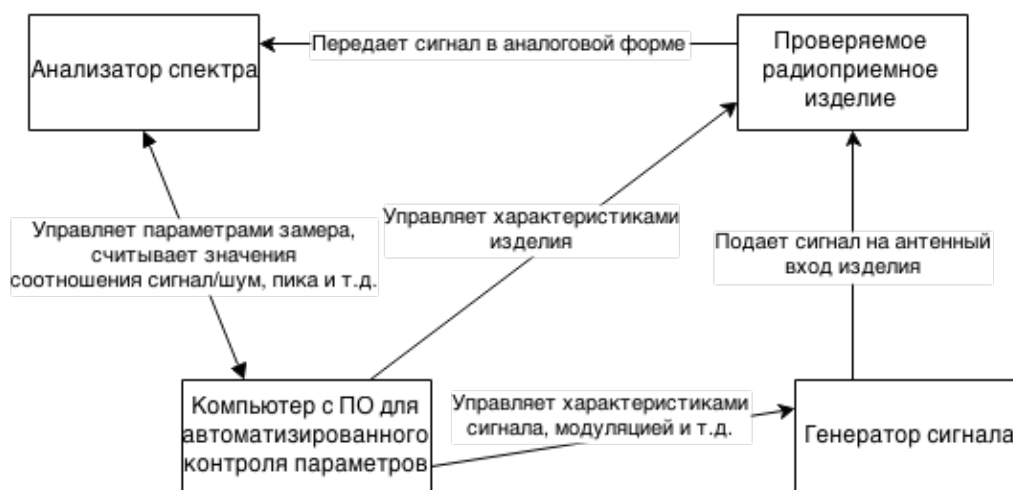


Рис. 1. Рабочее место для проверки радиоприёмного изделия

Эффективнее будет подход, при котором классы для управления устройством генерируются по протоколу сопряжения этого устройства. Рассмотрим пример на DSL:

```

class AgilentGeneratorDefinition
    extends RemoteDeviceDefinition{
    name = "Agilent"
    // тип протокола
    protocolType = tcp
    // адрес устройства по умолчанию
    defaultAddress = "192.168.0.5"

    // Список команд (не возвращают значения)
    def commands = Seq(
        TcpDeviceCommand(
            "setFrequency",
            "setFreq x",
            "On error message"
        ).withArgs(classOf[Int]).withArgsMapper{
            case arg: Int => String.valueOf(arg)
        }
    )

    // Список запросов (возвращают значение)
    def requests = Seq(
        TcpDeviceRequest(
            "getModuleStatus",
            "getModStat x",
            "On error message"
        )
    )
    
```

```
) .withArgs(classOf[String]).withResultMapper{  
  // Преобразование результата  
  case s: String => new ModuleStatus(s)  
}  
)  
}
```

Класс "AgilentGeneratorDefinition" представляет собой определение протокола устройства, а также задаёт некоторые настройки по умолчанию. Он может быть расширен с добавлением перехватов и специфичных настроек для определённых протоколов. Предполагается, что такой класс будет обработан с помощью техники Reflection [4], после чего будет сгенерирован класс управления устройством. Структура типичной команды такова: название метода в сгенерированном классе, название команды из протокола сопряжения устройства с указанием места, в который подставляется аргумент, сообщение об ошибке, типы аргументов и функция конвертации аргумента. Если будет указано два аргумента, например x и y, то для генерации класса управления будет необходимо указать оба типа. Для запроса можно указать алгоритм преобразования результата с помощью метода "withResultMapper" и техники сопоставления с образцом (pattern matching) [2]. Сгенерированные классы для управления устройствами будут объявлены с помощью ключевого слова "object", что позволит обращаться к ним из любой точки ПО и передавать как аргумент. При этом они будут существовать в единственном экземпляре.

Такой подход эффективен тем, что разработчик указывает только те настройки и параметры, которые относятся к бизнес-логике. Нет необходимости описывать реализацию взаимодействия через TCP или UDP сокет.

Кроме управления устройствами необходимо описывать испытания. В испытании обычно присутствуют четыре компонента:

- алгоритм испытания;
- таблица результатов, которая будет отображаться в интерфейсе пользователя;
- отчет с результатами испытания в формате PDF;
- информация об испытании (цель испытания, методы контроля, нормы и т.д.).

На DSL описание испытания выглядит следующим образом:

```
class Sensitivity extends  
  Challenge[List[Frequency], List[BigDecimal]]{  
  requirements = List(  
    new DeviceRequirement(AgilentSpectrumAnalyzer),  
    new DeviceRequirement(AgilentGenerator)  
  )  
}
```

```
// Исходные данные
data = List(4000 kHz, 5000 kHz, 7000 kHz)

override def algorithm {
  results = List()
  // Алгоритм испытания
  for (Frequency f : data) {
    if (interrupted) return
    AgilentGeneartor.setFrequency(f + 1 kHz)
    Receiver.getChannelByNumber(1).setFrequency(f)
    results :+ new BigDecimal(SpectrumAnalyzer.measureSnr())
  }
}

def report() {
  // Генерирование отчета
}

def view: ChallengeTable = {
  // Генерирование таблицы результатов
}

def info: ChallengeInfo = {
  // Информация об испытании
}
```

Класс "Challenge", означающий испытание, параметризованный. Первый тип указывается для исходных данных испытания, например, проверяемых частот. Второй — для результатов. Алгоритм генерации отчета располагается в методе "report". Для создания PDF документов можно использовать программную библиотеку iText [5]. Генерирование таблицы результатов осуществляется через абстракцию "ChallengeTable", скрывая тонкости реализации. Благодаря неявным преобразованиям возможно использование конструкции "4000 kHz". Информацию об испытании можно получить с помощью функции "info".

Интерфейс пользователя предполагается создавать с помощью технологии JavaFX 8 [6]. Автоматическая генерация интерфейса в данном случае нецелесообразна, так как могут применяться разные устройства с разными типами команд. Тогда бы пришлось описывать логику генерирования для каждого типа команды. Технология JavaFX 8 способствует быстрой разработке интерфейса пользователя, так как содержит развитые средства визуального конструирования интерфейсов.

Входная точка программы выглядит следующим образом:

```
class MainApp extends MainApplication {
```

```
// Регистрация испытаний
challenges += Seq(new Sensitivity,
    new Selectivity, new Intermodulation)

// Панель для управления устройствами
deviceControlPanel = new DeviceControlPanel

// Верхнее меню
menuBar = new MyMenuBar

// Дополнительная панель
additionalPanel = new SpectrumAnalyzer
}
```

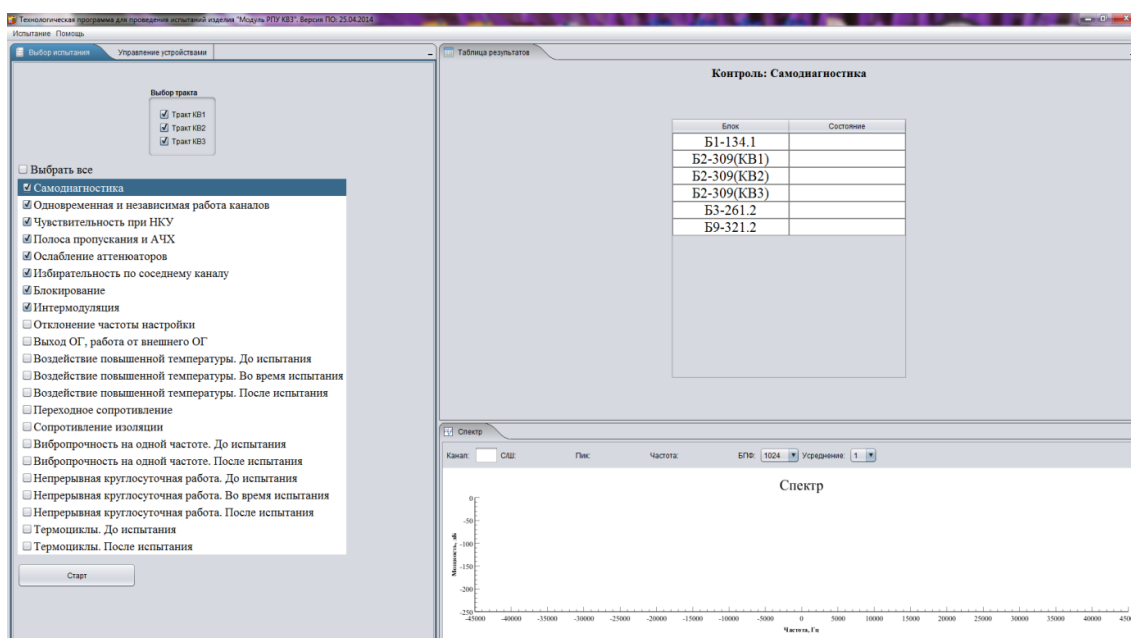


Рис. 2. Пример панели испытаний

Класс "MainApplication" содержит метод "Application.launch", который запускает программу. Здесь есть возможность настраивать интерфейс пользователя и добавлять на него пользовательские элементы, например, верхнее меню, панель для выбора проверяемого тракта и программный анализатор спектра.

Так как классы для управления устройствами объявлены с помощью ключевого слова "object", то нет необходимости регистрировать их. Обращение к ним возможно из любой точки программы. Испытания регистрируются в специальной коллекции, из которой они затем будут доставаться и преобразовываться к нужному виду. Логика работы с испытаниями, а именно запуск, остановка, генерация отчёта и т.д., располагается в классе "MainApplication". Пример возможного интерфейса пользователя изображён на рис. 2 и 3.

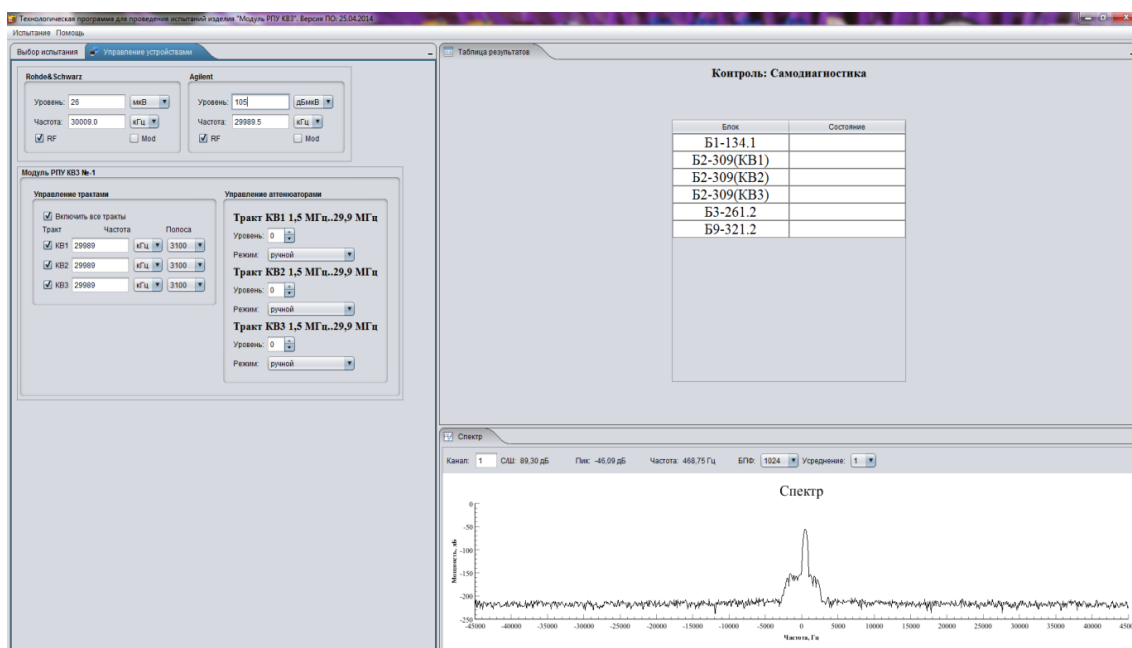


Рис. 3. Пример управления устройствами

Такой интерфейс удобен. В нем можно выделить два режима работы: ручной и автоматический. На вкладке "Выбор испытания" размещён список испытаний для автоматической диагностики изделия. На вкладке "Управление устройствами" располагается интерфейс для ручного управления устройствами. Размеры каждой вкладки могут быть изменены по усмотрению пользователя.

Благодаря использованию такого гипотетического DSL при разработке ПО для автоматизированного контроля параметров изделий разработчик может сосредоточиться только на бизнес-логике приложения, что позволяет разрабатывать ПО значительно быстрее и эффективнее. Такой результат достигается за счёт сокращения количества кода, необходимого для написания ПО, и уменьшения сложности разработки благодаря тому, что DSL внутренний и содержит готовые абстракции для решения часто встречающихся задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fowler M. Domain-Specific Languages. Addison-Wesley Professional; 1 edition, 2010.
2. Odersky M., Spoon L., Venners B. Programming in Scala: A Comprehensive Step-by-Step Guide. Artima Inc; 2 edition, 2011.
3. Scala Macros. URL: <http://scalamacros.org/> (дата обращения 26.10.2014).
4. Reflection. URL: <http://docs.scala-lang.org/overviews/reflection/overview.html> (дата обращения 26.10.2014).
5. iText. URL: <http://itextpdf.com/> (дата обращения 26.10.2014).
6. Java FX 8. URL: <http://docs.oracle.com/javase/8/javafx/get-started-tutorial/jfx-overview.htm> (дата обращения 26.10.2014).

DOMAIN-SPECIFIC LANGUAGE FOR DEVELOPING SOFTWARE FOR AUTOMATED TESTING OF ELECTRONIC DEVICES

A.Y. Vorobyev

postgraduate student, e-mail: flyenj@gmail.com

Omsk State University n.a. F.M. Dostoevskiy

Abstract. This article discusses the possibility of use of domain-specific programming language for rapid and effective develop of software for the automated testing of physical devices, such as radio receivers. It is assumed that for such a test is necessary to control multiple devices, for example analyzers, generators, etc.

Keywords: domain-specific languages, technological software, automation, automated control of parameters.

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ И СОПРОВОЖДЕНИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ ВУЗА

А.Л. Гуляева

аспирант, e-mail: al_kz@mail.ru

Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева, республика
Казахстан, г. Петропавловск

Аннотация. Создана и успешно внедрена информационная система для эффективного управления научно-исследовательской работой. Разработанная система предназначена для студентов и профессорско-преподавательского состава, она включает в себя мониторинг работы студенческого научного общества, управление изданиями, управление дипломным и курсовым проектированием с элементами искусственного интеллекта. По результатам внедрения этой системы университет достигнет следующих результатов: будет наблюдаться рост удовлетворённости всех субъектов образовательного процесса; будет просматриваться ярко выраженная тенденция инновационного развития всех подсистем на всех уровнях. В процессе реализации программы развития повысится конкурентоспособность университета в социуме.

Ключевые слова: информатизация образовательного учреждения, информационно-управляющая система, научно-исследовательская работа.

Процессы автоматизации на современном этапе развития общества проникли во все сферы деятельности человека. Внедрение информационных технологий процедуры автоматизации управления в образовательных учреждениях является одной из приоритетных задач современной системы образования [1].

Эффективность образовательной и научной деятельности высших учебных заведений в современных условиях определяется своевременностью и качеством управленческих решений, принимаемых в условиях неопределённости и риска, жёстких временных ограничений, неполноты и недостоверности информации, экономической целесообразности. Важная роль в этих процессах отводится активному применению современных информационных технологий, способствующих повышению качества, сокращению времени и снижению трудоёмкости принятия управленческих решений [2].

В современных условиях мирового социально-экономического развития особенно важной областью стало информационное обеспечение процесса управления, которое состоит в сборе и переработке информации, необходимой для принятия обоснованных управленческих решений. Это касается и системы образования, а в частности управления научно-исследовательской работой вуза.

Научно-исследовательская работа является составной частью деятельности коллектива университета, неразрывно связана с учебно-воспитательным процессом, способствует обеспечению тесного взаимодействия обучения, науки и практики, направлена на достижение высокого качества подготовки специалистов, повышение квалификации преподавательского состава.

Разработка системы управления научно-исследовательской работой студентов и профессорско-преподавательского состава, включающая в себя мониторинг работы студенческого научного общества, управление изданиями, управление дипломным и курсовым проектированием с элементами искусственного интеллекта становится более актуальным, когда в современных условиях повышение эффективности управления высшим учебным заведением является одной из ключевых задач, стоящих перед руководством вуза. Постоянное увеличение объёмов и интенсивности потоков информации приводит к необходимости использования информационных средств и технологий для повышения оперативности и адекватности её восприятия и обработки.

Используемые в настоящее время в большинстве вузов системы управленческой деятельности имеют ряд серьёзных недостатков, существенно снижающих результативность их функционирования в целом:

- программные комплексы автономны, не интегрированы в единую систему;
- устаревшая среда и файл-серверная технология;
- неэффективные структуры баз данных, хранимые данные не отражают реального состояния описываемых объектов;
- хранимые данные различных подсистем не согласованы друг с другом;
- точность, актуальность и своевременность данных неудовлетворительны из-за несогласованности процедур сбора и ввода данных в различных программных комплексах [3].

Автоматизация управления учебным заведением, применение средств информационных и телекоммуникационных технологий позволит [4]:

- автоматизировать и оптимизировать основные информационные процессы между образовательным учреждением и органами управления образованием;
- структурировать информацию и сделать её удобной и доступной для анализа;
- повысить эффективность и качество работы специалистов системы образования на всех уровнях за счёт оперативности в получении достоверной информации о состоянии объектов управления и сокращения времени на принятие решений и контроля исполнения.

Для разработки системы управления научно-исследовательской работой вуза необходимо решить следующие задачи:

- изучить нормативную базу научно-исследовательских работ студентов, а также письменных работ и выявить критерии для построения информационно-управляющей системы по письменным работам;
- дать краткое описание подсистем, которые будут входить в состав ИУС, а также объектов системы (определить объекты системы);
- описать информационные потоки подсистем ИУС;
- определить классы пользователей и разграничение прав доступа;
- спроектировать ИУС поддержки и сопровождения научно-исследовательской работы вуза;
- разработать ИУС поддержки и сопровождения научно-исследовательской работы вуза;
- тестирование и отладка ИУС поддержки и сопровождения научно-исследовательской работы вуза;
- разработать структуру и содержание руководств пользователей системы.

Применение данной системы позволит осуществить наилучшим образом организацию научно-исследовательской работы, а также осуществлять мониторинг работы студенческого научного общества, управление изданиями, управление дипломным и курсовым проектированием.

По результатам внедрения информационно-управляющей системы поддержки и сопровождения научно-исследовательской работы университет достигнет следующих результатов:

- будет наблюдаться рост удовлетворённости всех субъектов образовательного процесса;
- будет просматриваться ярко выраженная тенденция инновационного развития всех подсистем на всех уровнях.

В процессе реализации программы развития повысится конкурентоспособность университета в социуме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новикова Г.М. Корпоративные информационные системы: учебное пособие. М.: РУДН, 2008. 94 с.
2. Управление корпоративными ресурсами в информационных системах: монография. СПб.: СПбГИЭУ, 2010. 268 с.

3. Кривошеев Ю.В. Корпоративные информационные системы. Москва, 2008. 106 с.
4. Новиков Д.А., Суханов А.Л. Модели и механизмы управления научными проектами в ВУЗах. М.: Институт управления образованием РАО, 2005. 80 с.

DEVELOPMENT OF INFORMATION MANAGEMENT SYSTEM FOR RESEARCH WORK SUPPORT AT UNIVERSITY

A.L. Gulyaeva

Postgraduate Student, e-mail: al_kz@mail.ru

North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev, Kazakhstan, Petropavlovsk

Abstract. For an effective management of research work the information system was created and successfully implemented. The system is intended for students and teaching staff and includes monitoring of the student scientific society work, management of editions, management of graduate works and course projects with the elements of artificial intelligence. As a result of the project realization at university the satisfaction of all educational process subjects will grow and trend of innovative progress of all subsystems on all levels will appear. In the process of the development program realization the competitiveness of university in a society will rise.

Keywords: informatization of educational establishment, information management system, research work.

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ ДОЛГОСРОЧНОГО ДИСПАНСЕРНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ, ПЕРЕНЁСШИХ ИНФАРКТ МИОКАРДА

А.К. Гуц

д.ф.-м.н., профессор кафедры кибернетики ОмГУ, e-mail: guts@omsu.ru

А.Г. Дружинин

аспирант кафедры кибернетики ОмГУ, e-mail: saschalion@list.ru

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского

Аннотация. Описывается создаваемый программный комплекс, представляющий собой информационно-аналитический модуль долгосрочного диспансерного наблюдения пациентов, перенёсших инфаркт миокарда. Хотя различные АСУ внедряются в медицину с 1970-х годов, представленный модуль создаётся с целью более тесного взаимодействия клиники и пациента без привязки пациента к конкретному врачу. Это повышает как шансы больного на проведение своевременного лечения, так ответственность клиники за здоровье пациента.

Ключевые слова: модуль, программа, пациент, инфаркт миокарда.

Введение

Оснащение вычислительной техникой клиник здравоохранения позволяет легко решать проблемы, с которыми ранее медицина не справлялась, и это приводило либо к повышенной смертности среди определённой категории больных, либо к повторению тяжёлого заболевания. К этой категории относятся 30% пациентов, которые перенесли инфаркт миокарда и переносят его вновь в течение ближайших пяти лет вследствие неудовлетворительного амбулаторного диспансерного наблюдения. Причины столь печального обстоятельства самые разнообразные: это и занятость участкового врача, и частая смена участковых врачей и сестёр, включая не только увольнение, но и отпуск, повышение квалификации; наконец, это связано с тем, что не каждый пациент пойдёт в поликлинику, если его не пригласить на приём.

Решением данной проблемы является создание информационных систем, направленных на извлечение статистической информации о пациентах, состоящих на диспансерном учёте. Иначе говоря, требуется создать специализированный программный комплекс, представляющий собой информационно-аналитический модуль долгосрочного диспансерного наблюдения пациентов, перенёсших инфаркт миокарда, или, сокращено, ИАМ ПИКС.

ИАМ ПИКС должен позволить решать следующие задачи:

- получать доступ к данным пациента, независимо от его участковой принадлежности;
- вносить, изменять и анализировать данные клинической картины коронарной болезни сердца, истории заболевания, проводимого лечения в реальном времени;
- отслеживать сроки и качество выполнения рекомендаций врача;
- вызывать пациентов на приём путём автоматизированной отсылки пациентам смс- и email-сообщений в соответствии с установленными участковым врачом сроками;
- на основании введённых результатов лабораторно-инструментального обследования сигнализировать участковому врачу об отправке пациенту сообщения о сроках и объёме очередного обследования и явки к врачу;
- отображать на экране список пациентов, прошедших и не прошедших необходимое обследование.

Идея разработки такого программного комплекса принадлежит сотрудникам кафедры пропедевтики внутренних болезней Омской государственной медицинской академии. Потребителем ИАМ ПИКС в соответствии с их планами будут бюджетные и частные учреждения Омской области, занимающиеся оказанием медицинских услуг по реабилитации и диспансерному наблюдению пациентов, перенёсших инфаркт миокарда.

1. План реализации проекта

Для создания описанного программного комплекса необходимо провести работы, следуя следующему плану:

1. Создать базу данных о клинических исследованиях (150 чел.):
 - закупить реактивы для исследования агрегационной активности тромбоцитов и липидного спектра крови;
 - приобрести вегетотестер ВНС-микро для исследования вариабельности сердечного ритма и анализа наличия жизнеугрожающих нарушений сердечного ритма.
2. Создать программный продукт и провести его тестирование.
3. Подготовить руководство для пользователя.
4. Провести независимую экспертизу программы в лечебно-профилактических учреждениях г. Омска.
5. Осуществить продвижение программного продукта на рынке.

2. Программная часть

Основная цель описанного проекта — сокращение смертности постинфарктных больных и полная замена карты больного электронной картой пациента, вследствие чего произойдёт экономия средств и времени, потраченных на заполнение бумажных карт.

В связи с широким ростом популярности веб-технологий, простой и удобством их использования, а также возможностью удалённого доступа к программному модулю, ИАМ ПИКС был создан как веб-приложение.

Программный комплекс ИАМ ПИКС разработан на основе современного и популярного php-framework CakePhp с применением новейших технологий в сфере веб-индустрии php, mysql, html, css, javascript, json.

С целью сделать комплекс привлекательным не только для кардиологов, архитектура программы спланирована таким образом, что она может охватывать не только область кардиологии, но и любое другое направления медицины, то есть предусмотрена её масштабируемость и универсальность.

3. Достигнутые результаты

Работа по созданию ИАМ ПИКС ведётся в рамках 2-х годовичного проекта «Умник» совместно с сотрудниками Омской государственной медицинской академии. На данном этапе разработки аналитического модуля решены следующие задачи:

1. Обеспечена высокая безопасность от взлома программы злоумышленниками.
2. Предусмотрена возможность добавления, редактирования карточки пациента.
3. Реализован удобный поиск пациента с автозаполнением.
4. Создана система напоминания врачам о пациентах, которые нуждаются в приёме по диспансерному наблюдению или в срочном порядке — по заниженным или завышенным параметрам в результате лабораторных исследований.
5. Реализована система уведомления пациентов посредством рассылки смс- и e-mail-сообщений.
6. Каждое действие пользователя (врача) в программе сопровождается обязательными адресными уведомлениями.
7. Реализован сбор статистики и соответствующая аналитика (см. рис. 1).
8. Предусмотрена возможность расширения списка и значения параметров, показателей, направления лечения.
9. Возможен вывод на экран карточка пациента.
10. Пациент не привязан к конкретному врачу, что позволяет постоянно следить за его здоровьем.
11. Возможность составления плана лечения на год и более с последующим уведомлением за месяц до приёма (см. рис. 2).
12. Экспорт данных пациента в excel-таблицу.
13. Вывод карточки пациента на печать.

Обратим внимание на финансовую сторону проекта, касающуюся рассылки смс- и email-сообщений. Очевидно, что система должна подсчитывать денежные затраты клиники на данную рассылку и информировать об израсходованных средствах соответствующую службу клиники.

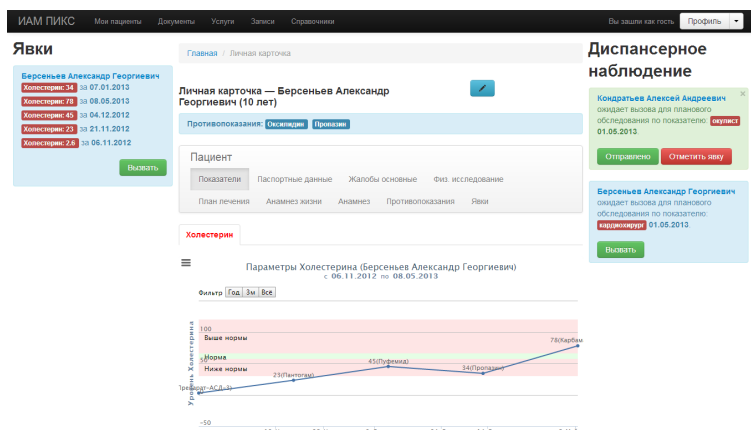


Рис. 1. Карточка пациента с графиком, составленным на основе показателей, введенных врачом в программу. Красным цветом на вкладке «Холестерин» отображён показатель, который имеет заниженные или завышенные параметры (ниже или выше нормы)

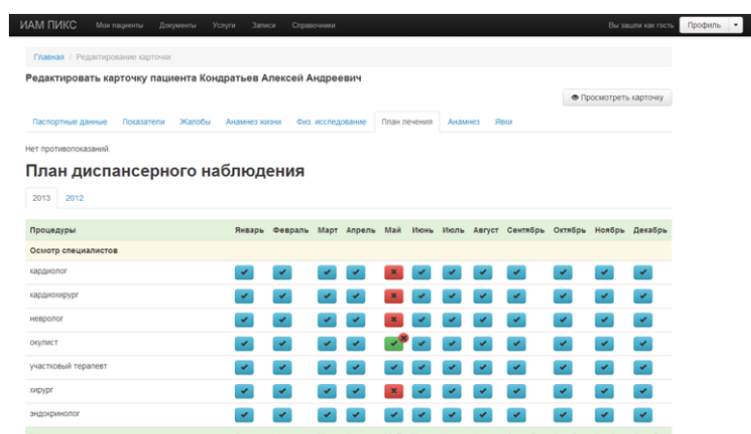


Рис. 2. План диспансерного наблюдения (плановое обследование), который может составить врач на текущий и последующий год для пациента. Врач и пациент будут получать соответствующие уведомления (рис. 3) за месяц о запланированном вызове пациента для планового обследования или для направления на обследование к конкретному врачу

Диспансерное наблюдение

Кондратьев Алексей Андреевич ✕

ожидает вызова для планового обследования к: **окулисту** **01.05.2013.**

Отправлено Отметить явку

Берсеньев Александр Георгиевич

ожидает вызова для планового обследования к: **кардиохирургу** **01.05.2013.**

Вызвать

Рис. 3. Уведомления по плану диспансерного наблюдения

Вызвать пациента

Здесь можно вызвать пациента **Берсеньев Александр Георгиевич** на приём к **кардиохирургу**.

05/29/2013 до

79032674732

Май 2013

Не	Пн	Вт	Ср	Чт	Пт	Сб	Вс
18			1	2	3	4	5
19	6	7	8	9	10	11	12
20	13	14	15	16	17	18	19
21	20	21	22	23	24	25	26
22	27	28	29	30	31		

Вписать

Рис. 4. Вызов пациента

Представим некоторые моменты в работе программы. На рис. 1 приведена карточка пациента с графиком, составленным на основе показателей, введенных врачом в программу. На рис. 2 представлен план диспансерного наблюдения (плановое обследование), который может составить врач на текущий и последующий год для пациента. На рис. 3 приведено окно «Уведомления по плану диспансерного наблюдения». При нажатии на кнопку «Вызвать» открывается окно «Вызвать пациента» (рис. 4), в котором врач может выбрать даты вызова пациента на приём. Уведомление будет отправлено в виде смс- или email-сообщения пациенту, если соответствующие данные приведены в личной карточке. Если пациент явился, то врач нажимает кнопку «Отметить явку» (рис. 3), после чего уведомление исчезает, а в плане (рис. 3) отображается запись о том, что пациент явился.

4. Дальнейшее развитие комплекса

Разработанный программный комплекс предполагается развивать в следующем направлении:

1. Реализовать автоматическое создание учётной записи пациента при добавлении его карточки врачом. В результате пациент будет видеть в аналитическом модуле данные только своего лечения и обследования в режиме он-лайн.
2. Сделать возможным получение широкого спектра аналитических данных: статистики количества мужчин и женщин, разделение их по районам обслуживания участковыми врачами, статистики, касающейся приёма препаратов.
3. Реализовать загрузку в программу результатов обследования, прогнозирования на основе статистических данных и анализа показателей пациентов.

Заключение

Хотя различные АСУ внедряются в медицину с 1970-х годов, представленный модуль создаётся с целью более тесного взаимодействия клиники и пациента без привязки пациента к конкретному врачу. Это повышает как шансы больного на проведение своевременного лечения, так ответственность клиники за здоровье пациента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дружинин А.Г. Обзор программ «Электронная карта пациента» // Математические структуры и моделирование. Омск: Ом. гос. ун-т. 2013. Том. 28, № 2. С. 68–79.

**THE INFORMATION AND ANALYTICAL PROGRAM OF LONG-TERM
DISPENSARY SUPERVISION OF THE PATIENTS WHO HAD A MYOCARDIAL
INFARCTION**

A.K. Guts

Doctor of Mathematics, Professor, e-mail: guts@omsu.ru

A.G. Druzhinin

Postgraduate Student, e-mail: saschalion@list.ru

Omsk State University n.a. F.M. Dostoevskiy

Abstract. The created program complex representing the information and analytical module of long-term dispensary supervision of patients with a myocardial infarction is described.

Keywords: module, program, patient, myocardial infarction.

ПРИМЕНЕНИЕ МОБИЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ ВУЗА

Е.А. Козак

аспирант, e-mail: k.elelochka@mail.ru

Е.В. Шевчук

канд. техн. наук, доцент, академик Международной академии информатизации,
e-mail: evshevch@mail.ru

Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева,
Республика Казахстан, г. Петропавловск

Аннотация. В статье рассматриваются направления использования мобильных технологий в современном высшем образовании. Возможности и достоинства их применения.

Ключевые слова: мобильные технологии, мобильное обучение.

Настоящее время характеризуется осознанным интересом к повышению качества образования на основе современных средств информатизации. Бурное развитие мобильных технологий непременно влечёт за собой их дальнейшее более активное проникновение в образование. Современное и своевременное использование мобильных технологий в образовании активизирует познавательный интерес студентов, даёт возможность студентам и преподавателям варьировать процесс обучения по интенсивности, способу получения информации и другим аспектам процесса обучения, снижает ограничения для получения образования вне зависимости от местонахождения с помощью мобильных устройств и технологий [1].

Президент Республики Казахстан Н.А. Назарбаев в своём «Послании народу стратегия “Казахстан-2050”» уделяет большое внимание модернизации методик преподавания и развитию онлайн-системы образования. Использование мобильных технологий и обучающих приложений позволит совершенствовать педагогический процесс. Многие учёные и педагоги уверены, что будущее обучения с поддержкой ИКТ связано и зависит именно от распространения мобильных средств связи, популярности смартфонов и айфонов, появления большого количества учебных приложений и программ, а также новых технологий, которые расширяют возможности и качество образования.

Несомненными преимуществами использования мобильных устройств и технологий являются:

- быстрый доступ к аутентичным учебным и справочным ресурсам и программам в любое время и в любом месте;
- постоянная обратная связь с преподавателем и учебным сообществом;

- учёт индивидуальных особенностей студента — диагностика проблем, индивидуальный темп обучения и т. д.;
- повышение мотивации обучаемых за счёт использования знакомых технических средств и виртуального окружения;
- организация автономного обучения;
- создание персонализированного профессионально ориентированного обучающего пространства студента;
- развитие навыков и способностей к непрерывному обучению в течение жизни.

Большинство современных студентов технически и психологически готовы к использованию мобильных технологий в учебном процессе, и необходимо рассматривать новые возможности для более эффективного использования потенциала мобильных устройств и технологий. Решение этой задачи требует организационных усилий со стороны педагогов, исследовательской и методической работы преподавателей по внедрению стратегий, форм и методов мобильного обучения в учебный процесс высших учебных заведений [2]. Педагоги уже не могут не обращать внимание на очевидный факт — популярность мобильных средств связи среди молодёжи; именно поэтому следует проанализировать, как данные виды связи могут способствовать оптимизации процесса обучения в вузе [3].

Существует ряд способов применения мобильных устройств в учебном процессе:

- для воспроизведения мультимедийных обучающих веб-ресурсов (аудио-файлы, видеофайлы, подкасты, графика, карты, изображения);
- для обеспечения быстрого доступа на обучающие сайты, ресурсы, справочники, словари;
- как собственно обучающее средство при условии разработки учебных материалов, адаптированных для платформ мобильных средств связи (SMS-тесты, учебные пособия и инструкции на базе мобильных приложений);
- для учебной коммуникации (SMS-сообщения, Twitter, вебинары, Skype и т. д.).

Перспективным направлением применения мобильных технологий для поддержки традиционного учебного процесса является предоставление обучающимся возможности доступа к учебной информации, содержащейся в сетевых курсах, через образовательный портал обучающей организации, адаптированный для мобильных устройств. Указанные ресурсы могут использоваться студентами в режиме самостоятельной работы для подготовки к участию в

семинарах и диспутах, выполнения групповых проектов, заданий и курсовых работ, а также самотестирования, промежуточного и итогового тестирования.

Кроме того, учащимся может предоставляться возможность получать на свои мобильные устройства уведомления, напоминания, а также результаты прохождения контрольных мероприятий. В рамках поддержки очного учебного процесса мобильные устройства можно использовать также для проведения краткого тестирования в конце занятия, фиксирования важной информации (используя функцию аудиозаписи и фотокамеры), оперативного доступа к справочным и информационно-образовательным материалам во время занятий. Мобильные устройства незаменимы для проведения практических занятий вне компьютерного класса.

Таким образом, внедрение мобильных технологий в учебный процесс позволяет:

- обеспечить непрерывность и целостность образовательного процесса за счёт возможности непрерывного доступа к справочным материалам и образовательным ресурсам;
- повысить качество преподавания за счёт оперативной реализации обратной связи (например, путём проведения краткого тестирования в конце занятия, что позволит преподавателям получать оперативную информацию об усвоении материала студентами (какая часть учебного материала усвоена учащимися лучше, каким разделам следует уделить больше внимания и насколько поддерживается контакт с аудиторией); на основе полученной информации преподаватель может корректировать изложение материала;
- обеспечить информационную и методическую поддержку практических занятий;
- предоставить более качественные услуги в части организации обучения: удалённый доступ к плану обучения, рассылка различных новостей и уведомлений.

Применение мобильных технологий для поддержания образовательного процесса может повысить качество обучения и привлекательность предоставляемых образовательных услуг для студентов вуза. Обучение становится своевременным, достаточным и персонализированным. В связи с вышеизложенным можно сделать вывод, что на настоящий момент исследования, связанные с методиками и методами использования мобильных технологий, являются своевременными, перспективными и актуальными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванченко Д.А. Управление мобильными технологиями в информационном пространстве современного вуза // Высшее образование в России. 2014. № 7. С. 93–100.

2. Винеvская А.В. Использование потенциала информационных технологий в создании мобильной образовательной среды // Концепт. 2012. № 9. С. 78–84.
3. Голицына И.Н., Половникова Н.Л. Мобильное обучение как новая технология в образовании // Образовательные технологии и общество. 2011. № 1. С. 241–252.

THE USE OF MOBILE TECHNOLOGIES IN EDUCATIONAL PROCESS OF THE UNIVERSITY

E.A. Kozak

Postgraduate Student, e-mail: k.elenochka@mail.ru

E.V. Shevchuk

Ph.D., Associate Professor, Academician of the International Informatization Academy,
e-mail: evshevch@mail.ru

North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev, Kazakhstan, Petropavlovsk

Abstract. The directions in the use of mobile technologies in modern higher education, the possibilities and advantages of their use are considered.

Keywords: mobile technologies, mobile learning elements.

КАРТЫ ШУХАРТА КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ В АКТОРНОЙ МОДЕЛИ

Е.А. Тюменцев

преподаватель кафедры компьютерных технологий и сетей,
e-mail: etyumentcev@gmail.com

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск

Аннотация. В последнее время растёт интерес к акторной модели написания параллельных приложений. Акторная модель недедуктивна в том смысле, что вычислительные шаги в данной модели могут не следовать из предыдущих шагов. А значит для поиска и исправления ошибок, повышения надёжности работающих приложений требуются иные инструменты, чем в случае последовательных программ. В качестве одного из таких инструментов в библиотеке HWdTech.DS было апробировано применение контрольных карт Шухарта.

Контрольные карты были использованы на одном портале бесплатных объявлений с ежедневной посещаемостью в 30000 посетителей и более тысячи ежедневно размещаемых объявлений.

Благодаря контрольным картам были получены следующие результаты:

1. Снижение количества ошибок при открытии страниц с 7% до 0,01%.
2. Уменьшение времени отклика на запросы пользователя с 4,5 с до 0,8 с.
3. Сокращение время определения источников проблем.
4. Обнаружение некоторых видов аномального поведения пользователей.

Ключевые слова: акторная модель, карты Шухарта.

В последние десять лет наблюдается рост интереса к акторной модели написания параллельных приложений [1]. Объяснение этому можно найти в [2]. В [3] был описан подход к разработке библиотеки для написания параллельных приложений в модели акторов HWdTech.DS. Напомним, что в той статье была поставлена задача — библиотека HWdTech.DS должна соответствовать измеримому уровню согласно модели зрелости Гарольда Керцнера[4].

В [5] было показано, что акторная модель не дедуктивна в том смысле, что вычислительные шаги в данной модели могут не следовать из предыдущих шагов. Это может значительно осложнить пошаговую отладку приложений, реализующих модель акторов, которая широко применяется в традиционном программировании. А значит возникает потребность в применении принципиально других инструментов для поиска и исправления ошибок, методов повышения надёжности работающих приложений. В качестве одного из таких инструментов в библиотеке HWdTech.DS было апробировано применение

контрольных карт Шухарта. В [6] подробно описаны сами контрольные карты, их свойства и примеры использования.

Контрольные карты Шухарта были созданы Уолтером Шухартом в 1929 году и используются для определения моментов выхода процесса из стабильного состояния с целью установки возможных причин появившейся нестабильности. Контрольные карты обладают тремя существенными преимуществами:

1. Просты для расчётов — были специально разработаны так, чтобы ими могли пользоваться рабочие без высшего образования.
2. Имеют визуальное представление.
3. Имеют чёткие критерии, когда процесс переходит в нестабильное состояние, так что их легко алгоритмизировать и вычислять автоматически.

Контрольные карты были использованы на одном портале бесплатных объявлений с ежедневной посещаемостью в 30000 посетителей и более тысячи ежедневно размещаемых объявлений.

Благодаря контрольным картам были получены следующие результаты:

1. Одна из причин, которая заставила администрацию сайта задуматься о переписывании всего сайта целиком: точное количество неизвестно, однако, если судить по логам, порядка 70000 запросов страниц в день не удавалось выполнить из-за генерации разного вида исключений или 7% от общего числа запрашиваемых страниц. Важно не только добиться снижения общего числа ошибок, но сделать так, чтобы со временем их количество не вернулось на прежний уровень.

На сайте для основных функций, предоставляемых сайтом, была создана своя контрольная карта Шухарта, на которой фиксировалось количество ошибок, возникших при выполнении этой функции за сутки.

Сама по себе фиксация количества ошибок в разрезе операций позволила выявить наиболее проблемные функции и сконцентрировать на них все внимание в первую очередь. При внесении исправлений мы смотрели, как менялся уровень ошибок по той или иной функции, а главное, наступала ли стабилизация процесса. Дело в том, что если мы вносим исправление в код и применяем его к рабочей системе, то мы не можем утверждать, помогли ли эти изменения в полной мере или нет — неизвестно, когда эта ошибка возникнет в следующий раз. Если же выкладывалось обновление, которое содержало ошибки, контрольные карты нам сигнализировали об этом. За три месяца удалось свести количество ошибок при запросе страниц до 1-2 в неделю.

2. С помощью контрольных карт удалось показать, что несколько попыток редизайна сайта не достигли желаемого эффекта. После обновления сайта наблюдалась повышенная активность пользователей — но карты Шухарта

по количеству поданных объявлений, количеству отредактированных, удалённых объявлений показали, что всплеск имел краткосрочный эффект, связанный лишь с необходимостью адаптироваться к новому интерфейсу у постоянных посетителей.

3. Экономия времени при обнаружении проблем. В компании, владеющей сайтом, исторически сложились два подразделения ИТ-специалистов: программисты и системные администраторы. Коммуникация между отделами была на низком уровне. Поэтому, если возникали проблемы с работой сайта, то устранение проблем шло по схеме: сначала программисты пытались определить — не является ли источником проблемы ошибка в программном коде, если они не могли найти ошибку, то передавали проблему системным администраторам. Если системные администраторы исправляли ошибку, то обычно программисты не знали, что являлось причиной проблемы. Особенно часто возникали проблемы с производительностью базы данных, что сильно влияло на общее быстродействие всего сайта. Была настроена контрольная карта групповых значений, которая измеряла скорость выполнения 10 подряд выполненных одинаковых запросов в определённые промежутки времени. В обычном состоянии данная карта показывала статистическую стабильность. Теперь, если программисты при написании запросов делали ошибки, то данная карта сразу показывала нам возникновение особой причины замедления и ошибка оперативно устранялась. Если же наблюдалось замедление скорости работы базы, при этом контрольная карта не давала нам до этого никаких сигналов, то, скорее всего, проблема заключалась в настройках, которые были выполнены системными администраторами.
4. Однажды контрольные карты помогли выявить конкурента, который, пользуясь ресурсами сайта, предлагал воспользоваться другим сервисом. Одна из контрольных карт была настроена на количество сообщений, которые пользователи сайта отправляют друг другу. В один день был получен сигнал от карты, свидетельствующий об особой причине возросшего количества пользовательских сообщений. Поверхностный анализ показал, что этот рост произошёл из-за активности одного пользователя, который от своего имени предлагал другим пользователям разместить объявления на сайте-конкуренте.

Приведённые примеры демонстрируют возможности применения контрольных карт Шухарта для анализа работы и разработки параллельных приложений. С помощью карт Шухарта удалось существенно повысить надёжность работы портала объявлений, а также обнаружить ряд проблем, о существовании которых не было известно вообще.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hewitt C., Bishop P., Steiger R. A universal modular ACTOR formalism for artificial intelligence / IJCAI'73 Proceedings of the 3rd international joint conference on Artificial intelligence. P. 235–245.
2. Тюменцев Е.А. The Actors Model Guide: руководство по разработке серверов и серверных приложений. URL: <http://actorsmodel.ru/glava-1-actori-nachalo/> (дата обращения: 29.10.2014).
3. Тюменцев Е.А. Библиотека HWdTech.DS с точки зрения модели зрелости // Математическое и компьютерное моделирование: сборник материалов научной конференции (Омск, 18 октября 2013 г.). Омск: Изд-во Ом. гос. ун-та, 2013. 112 с. С. 106–108.
4. Керцнер Г. Стратегическое планирование для управления проектами с использованием модели зрелости: Пер. с англ. М.: Компания АйТи; М.: ДМК Пресс, 2003. 320 с.
5. Carl Hewitt, Gul Agha. Guarded horn clause languages: are they deductive and logical? / FGCS, 1988, pages 650–657.
6. Уилер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами: Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта = Understanding Statistical Process Control. — М.: «Альпина Паблишер», 2009. С. 310

SHEWHART CARD AS A TOOL TO IMPROVE RELIABILITY IN THE ACTOR MODEL

Е.А. TyumencevSenior Teacher, e-mail: etyumentcev@gmail.com

Omsk State University n.a. F.M. Dostoevskiy

Abstract. In the last ten years there has been growing interest in the Actor model of parallel applications writing. The Actor model is nondeductive in the sense that the steps in the computational model may not follow the previous steps. So to find and fix bugs, improve the reliability of running applications it requires different tools than in the case of sequential programs. As one of such tools in the library HWdTech.DS the use of Shewhart control charts was tested. The charts were used on a portal of free ads with a daily attendance of 30,000 visitors and more than a thousand daily published advertisements. Thanks to the charts the following results were obtained:

1. Reducing the number of errors in the opening pages from 7 % to 0.01 %.
2. Reducing the response time to user requests from 4.5 s to 0.8 s.
3. Reducing of time for identification of the sources of problems.
4. Detecting of certain types of abnormal behavior of users.

Keywords: actor model, Shewhart charts.

ПРИМЕНЕНИЕ СЕМЕЙСТВ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ УСТОЙЧИВЫХ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ

С.В. Белим

профессор, д.ф.-м.н., e-mail: sbelim@mail.ru

Е.А. Илюшечкин

аспирант, e-mail: ilushechkinea@yandex.ru

Факультет компьютерных наук, Омский государственный университет
им. Ф.М. Достоевского

Аннотация. Рассмотрено применение семейств ортогональных функций для построения цифровых водяных знаков. Предложен алгоритм кодирования сообщений на основе свойств ортогональных функций, который позволяет строить цифровые водяные знаки, устойчивые к различным воздействиям на стеганографический контейнер. Исследовано влияние выбора семейства функций на стойкость цифрового водяного знака, построенного по предложенному алгоритму, к ряду искажающих воздействий.

Ключевые слова: семейства ортогональных функций, цифровые водяные знаки, многочлены Чебышёва, функции Уолша, искажающие воздействия.

Введение

Внедрение скрытой информации в растровые изображения является одним из динамично развивающихся разделов информационной безопасности, получившим название стеганографии. На сегодняшний день разработано большое количество алгоритмов встраивания информации как в пространственной области изображений, так и в частотной. Дополнительный импульс в развитии стеганографии появился в связи с развитием направления, которое принято называть цифровыми водяными знаками. Под цифровыми водяными знаками принято понимать некоторую информацию, встроенную в изображение и неотъемлемо связанную с ним, позволяющую однозначно идентифицировать источник происхождения изображения. Одно из основных требований к алгоритмам встраивания цифровых водяных знаков — устойчивость к воздействию на контейнер. То есть, встраиваемая информация должна восстанавливаться после широко распространённых преобразований растровых изображений, таких как изменение формата, применение сглаживающих фильтров и т.д.

Устойчивость большого количества стеганографических алгоритмов к воздействию случайного гауссова шума и JPEG-сжатия была исследована в работе [1]. На основе компьютерного эксперимента было показано, что наилучшей устойчивостью обладают методы Коха [2], Куттера [3] и Фридрих [4].

В данной работе разрабатывается алгоритм формирования цифровых водяных знаков, устойчивых к различным воздействиям, с использованием свойств семейства ортогональных функций, предложенного в статье [5] для кодирования информации.

1. Кодирование цифровых водяных знаков и процедура встраивания в контейнер

Для построения устойчивых водяных знаков будем использовать семейство ортогональных функций — множество функций $\{f_i(x) \mid i \in \mathbf{N}\}$ таких, что существует весовая функция $w(x)$ и интервал $[a, b]$, для которых

$$\int_a^b f_i(x)f_j(x)w(x)dx = \delta_{ij}, \quad (1)$$

где δ_{ij} — символ Кронекера.

Пусть информация, которую необходимо закодировать, представляет собой последовательность вещественных чисел k_i ($i = 1, \dots, n$). Используя семейство ортогональных функций $\{f_i(x) \mid i \in \mathbf{N}\}$, построим функцию:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n k_i f_i(x). \quad (2)$$

Исходные числа k_i могут быть восстановлены из $F(x)$ на основе свойства ортогональности с помощью простого соотношения:

$$k_i = \int_{x_1}^{x_2} f_i(x)f(x)w(x)dx. \quad (3)$$

На основе рассмотренного выше подхода можно построить следующий алгоритм кодирования k -битовой строки $(b_1, b_2, \dots, b_k)$ водяного знака в виде массива из n значений:

1. Выбрать k функций: $f_1, f_2, \dots, f_k$ из семейства ортогональных функций
2. Выбрать n точек $p_1, p_2, \dots, p_n$ на отрезке ортогональности $[x_1, x_2]$
3. Для каждого $i = 1, \dots, n$ вычислить сумму $v_i = \sum_{j=1}^k b_j f_j(p_i)$

Получившийся массив $(v_1, \dots, v_n)$ представляет собой дискретизированный сигнал, который может быть добавлен к исходному изображению. Для лучшего распределения информации о водяном знаке по изображению сигнал можно добавлять в частотной области изображения. В нашем случае для перехода в частотную область использовалось дискретное косинусное преобразование.

Извлечь данный цифровой водяной знак можно, применив численное интегрирование по точкам p_j , $j = 1, \dots, n$. Для бита b'_i значение интегрируемой функции в точке p_j определяется как произведение $f_i(p_j)r_jw(p_j)$, где r_j — значения тех точек водяного знака, в которые он был ранее встроен. Очевидно, значения данных точек складываются не только из встроенного сигнала, но и из исходных значений точек контейнера. Тем не менее, на практике исходные значения контейнера мало коррелируют с ортогональными функциями, и их влиянием можно пренебречь.

К полученным оценкам b'_i можно применить пороговую схему, отображающую вещественную прямую на множество $\{0, 1\}$, получив тем самым восстановленное сообщение.

Поскольку n не зависит от k , исходную информацию произвольного объёма (но не превышающего пропускной способности контейнера) можно равномерно растягивать по фиксированному количеству точек, доступному для встраивания в данный контейнер. Это позволяет эффективно и гибко использовать все доступные для встраивания точки.

2. Постановка компьютерного эксперимента

В ходе эксперимента была протестирована устойчивость цифровых водяных знаков, сформированных с помощью предложенного метода, к ряду популярных преобразований изображения — зашумлению, JPEG-сжатию, размывающей фильтрации. Мерой корректности распознавания цифрового водяного знака являлось отношение количества неверно распознанных битов сообщения к их общему числу, Bit Error Rate (BER). В роли контейнеров выступали широко используемые для тестирования различных методов обработки цветные изображения «Lenna», «Mandrill» и «Pepper» размером 512×512 . Все тестируемые методы использовали для встраивания канал яркости, обозначаемый буквой Y в цветовой схеме $YCbCr$.

Было протестировано три вида зашумляющих воздействий: аддитивный шум с гауссовым распределением, аддитивный шум с равномерным распределением и неаддитивный импульсный шум. Под аддитивным шумом понималось изменение яркости каждой точки изображения на значение элемента псевдослучайной последовательности вещественных чисел, имеющей равномерное или нормальное распределение с заданными параметрами. Параметром равномерного шума являлась верхняя граница интервала возможных значений, симметричного относительно нуля. Этот же параметр рассматривался как мера искажающего воздействия. Для гауссового шума параметром и, одновременно, мерой воздействия являлось стандартное отклонение нормально распределённой случайной величины с нулевым средним, которую имитировала псевдослучайная последовательность. Неаддитивный импульсный шум был реализован как замена с фиксированной вероятностью p каждой точки изображения на точку с максимальной яркостью. В качестве меры искажающего воздействия в данном случае выступала величина p , выраженная в процентах.

Для реализации размывающей фильтрации использовался простой арифме-

тический фильтр, заменяющий значение яркости каждой точки изображения на среднее арифметическое значение яркости в окне размером 3×3 точки. Для краевых неугловых точек среднее значение вычислялось по прямоугольнику размером 3×2 , а для угловых — по квадрату размером 2×2 . В качестве силы искажающего воздействия рассматривалось количество последовательных применений фильтра.

При JPEG-сжатии использовался стандартный алгоритм JPEG, в качестве силы воздействия рассматривался параметр алгоритма, процентно выражающий качество изображения после сжатия.

Чтобы определить зависимость точности извлечения водяного знака от силы искажающего воздействия и построить соответствующие графики, в качестве водяного знака использовалась случайная последовательность из 32 байтов, повторенная 16 раз в целях надёжности. Таким образом, каждый бит встраивался и извлекался 16 раз, а его итоговое извлечённое значение определялось как округлённое среднее всех его извлечений. Чтобы уменьшить погрешность, вызванную случайным характером данных, эксперимент проводился по несколько раз на каждом изображении и затем усреднялся.

В качестве способа численного интегрирования использовался метод трапеций.

3. Влияние выбора семейства ортогональных функций

В эксперименте были рассмотрены четыре семейства ортогональных функций. Первое — семейство синусов вида $f_n(x) = \sqrt{2} \sin(\pi n x)$. Для данного семейства использовался отрезок ортогональности $[0; 2]$. Чтобы пики различных функций суммы не совпадали, имеет смысл выбирать функции семейства со взаимно простыми периодами, то есть, со взаимно простыми номерами. Тогда за счёт снижения максимальных искажений коэффициентов можно будет повысить коэффициент силы встраивания без ущерба для качества изображения.

Многочлены Чебышёва первого порядка вычисляются по формуле $f_n(x) = \cos(n \arccos(x))$ и имеют единственный отрезок ортогональности $[-1; 1]$, на котором и вычислялись значения суммы функций. Характерной особенностью многочленов Чебышёва является то, что они имеют нетривиальную весовую функцию, при умножении на которую произведение двух многочленов стремится к бесконечности на границах отрезка ортогональности. Быстрый рост у границ отрезка усложняет восстановление по точкам — при вычислении интеграла приходится немного сужать пределы интегрирования (в нашем случае — на 0.1%). Для более точной оценки возможно применение неравномерной сетки.

Многочлены Лежандра также имеют единственный отрезок ортогональности $[-1; 1]$, но в отличие от многочленов Чебышёва имеют тривиальную весовую функцию и не создают проблем на концах отрезка.

Наконец, было протестировано семейство ортогональных функций Уолша, которые, как и многочлены Лежандра, имеют тривиальную весовую функцию и отрезок ортогональности $[-1; 1]$.

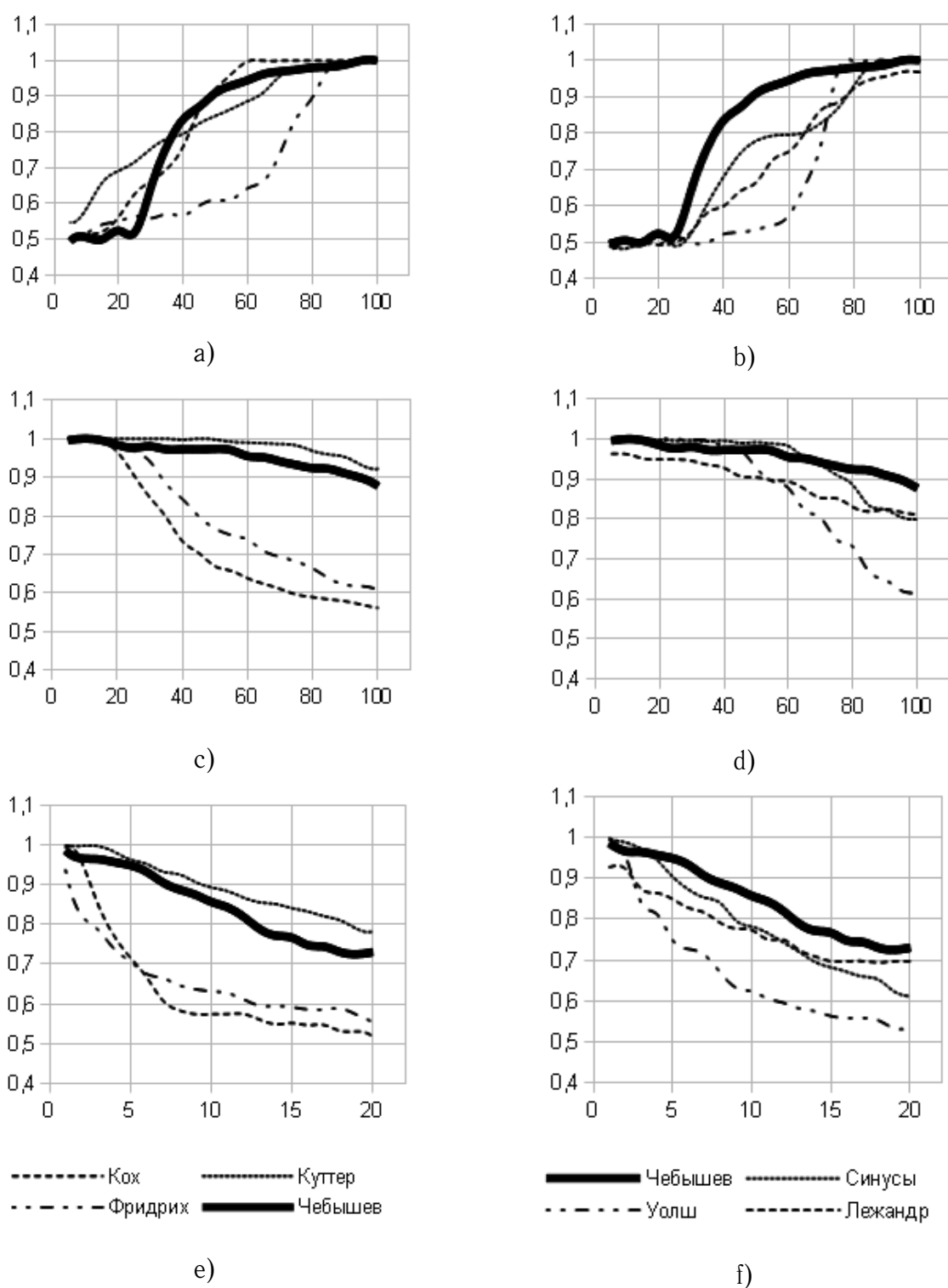


Рис. 1. Устойчивость различных методов к искажающим воздействиям: а-б) JPEG-сжатие; с-д) Равномерный шум; е-ф) Импульсный шум.

4. Результаты эксперимента

По результатам проведённого компьютерного эксперимента было построено несколько графиков (рис. 1). По оси абсцисс на графиках отложена сила искажающего воздействия, по оси ординат — значение $(1 - \text{BER})$. Результаты для размывающей фильтрации не показаны, так как все протестированные семейства функций оказались не стойкими к данному виду искажающего воздействия. На рисунках 1 (b, d, f) показаны результаты кодирования по предложенной нами схеме для различных семейств функций. Видно, что практически на всех участках лучший результат показывает семейство многочленов Чебышёва первого рода. Второй результат показывает семейство тригонометрических функций.

Результаты, полученные для многочленов Чебышёва, были сопоставлены с результатами нескольких хорошо известных методов встраивания — методов Коха [2], Куттера [3] и Фридрих [4] (левый столбец на рис. 1 (a, c, e)). Предложенный метод оказался устойчивее методов Фридрих и Коха к зашумлению равномерным и импульсным шумом, более устойчив к JPEG-фильтрации, чем метод Фридрих (рис. 1).

Развитие идеи использования ортогональных семейств функций для построения цифровых водяных знаков может заключаться в апробации других семейств и их сравнении на более широком спектре искажающих воздействий. Важным шагом также является исследование влияния метода численного интегрирования на результат восстановления водяного знака для различных семейств ортогональных функций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Илюшечкин Е.А. Некоторые способы повышения устойчивости цифровых водяных знаков к искажающим воздействиям // Вестник Омского университета, 2013, Т. 70, №4, С. 217-220.
2. Koch E., Zhao J. Towards Robust and Hidden Image Copyright Labeling // IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing. Greece. 1995. P. 123–132.
3. Kutter M., Jordan F., Bossen F. Digital Signature of color image using amplitude modulation // Proc. of the SPIE Storage and Retrieval for Image and Video Databases V. 1997. Vol. 3022. P. 518–526.
4. Fridrich J. Combining Low-Frequency and Spread Spectrum Watermarking // Proc. of the SPIE Conference on Mathematics of Data/Image Coding, Compression and Encryption. 1998. Vol. 3456. P. 2–12.
5. Белим С.В., Белим С.Ю. Шифрование сообщений на основе собственных функций операторов // Математические структуры и моделирование, 2008, № 18, С. 95–97.

APPLYING FAMILIES OF ORTHOGONAL FUNCTIONS TO BUILDING RESISTANT DIGITAL WATERMARKS

S.V. Belim

Professor, Doctor Of Physical and Mathematical Sciences, e-mail: sbelim@mail.ru

E.A. Ilushechkin

Postgraduate Student, e-mail: ilushechkinea@yandex.ru

Omsk State University n.a. F.M. Dostoevskiy

Abstract. In this paper, the use of families of orthogonal functions for digital watermarks building is considered. We suggest an algorithm of message encoding based on properties of orthogonal functions that allows to build digital watermarks resistant to different impacts on the stegocontainer. We also investigate how the choice of orthogonal functions family influences the resistance of digital watermark built using the proposed method to various distortions.

Keywords: families of orthogonal functions, digital watermarks, Chebyshev polynomials, Walsh functions, distorting effects.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫХ ДОСТУПОВ

Д.М. Бречка

к.т.н., e-mail: dbrechkawork@yandex.ru

Р.А. Исин

студент, e-mail: newshriek@gmail.com

Факультет компьютерных наук, Омский государственный университет
им. Ф.М. Достоевского

Аннотация. Описана реализация алгоритмов поиска несанкционированных доступов для модели Take-Grant. Приводится внутренняя структура программных продуктов, реализующих алгоритмы, форматы входных и выходных данных, результаты тестирования производительности программных продуктов.

Ключевые слова: алгоритм, безопасность, Take-Grant, программирование, объекты, реализация..

Введение

В работах [1–4] предлагаются алгоритмы поиска tg-путей островов, мостов, начальных и конечных пролётов мостов в графе доступов. Для поиска tg-путей предлагается модифицированный алгоритм Дейкстры, для поиска островов — модифицированный алгоритм Флойда, для поиска мостов, начальных и конечных пролётов мостов предлагаются оригинальные алгоритмы, основанные на алгоритмах поиска в глубину и в ширину. Далее описана программная реализация и оптимизация алгоритмов поиска tg-путей, островов и мостов.

Для реализации алгоритмов поиска несанкционированных доступов было решено использовать объектно-ориентированный подход к программированию. В качестве языка программирования был выбран Java. Для разработки и отладки программного кода использовалась интегрированная среда разработки IntelliJ IDEA.

Для поиска основных структур в графе доступа было разработано три отдельных приложения, выполненных по общей схеме:

- 1) ввод данных;
- 2) создание графа доступов в памяти компьютера;
- 3) преобразование графа доступов;
- 4) применение соответствующего алгоритма;

5) вывод результатов работы.

Приложения различаются на этапах 3 и 4, так как для поиска различных структур в графе доступов необходимо различное преобразование исходного графа и применение различных алгоритмов.

Данные этапы в приложениях реализуются различными классами. Так поиск tg-пути реализован классом `Dijkstra.java`, поиск островов — классом `Floid.java`, для поиска мостов используется класс `BridgeSearcher.java`.

Помимо классов, реализующих основной функционал, в программных продуктах также используются вспомогательные классы:

1. `Node.java` — описывает узел графа доступов.
2. `Link.java` — описывает связь между вершинами графа.
3. `Input.java` — используется для реализации ввода данных в программу.
4. `Main.java` — служит для связи классов в единую структуру и вывода результатов работы.

Вспомогательные классы одинаковы для всех трёх приложений. Ввод данных в программу организуется через файл формата csv, содержащий матричное представление графа доступов. Данный файл должен быть подготовлен заранее вручную или с помощью специальных программ. Формат матрицы приведён на рисунке 1 (крайний левый столбец добавлен на рисунок для ясности, в файле отсутствует). В первой строке файла записываются все вершины графа, во второй — определяется тип вершины. Последующие строки содержат матричное представление графа. По матрице можно определить направление дуги: начальная вершина записана в строке слева, конечная — сверху. Вывод результатов работы приложения осуществляется в консоль.

В случае поиска tg-путей, мостов и пролётов мостов на вход приложению также передаются названия вершин, между которыми отыскивается соответствующая структура. Названия вершин передаются через параметры командной строки. В качестве результата работы приложения выдают:

1. В случае поиска островов — матрицу достижимостей, по которой можно делать вывод о наличии или отсутствии островов в графе.
2. В случае поиска tg-путей — длину пути, а также матрицу весов для алгоритма Дейкстры, по которой можно восстановить сам путь, либо сообщение о том, что путь не найден.
3. В случае поиска мостов и пролётов мостов — выводится список вершин, входящих в мост (пролёт), либо сообщение об отсутствии моста (пролёта).

Анализ производительности программных продуктов проводился на компьютере со следующими основными характеристиками:

1. Процессор: Intel Core i5-3210M 2.50Ghz.

	10									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	S	O	S	O	O	O	O	S	O	S
A	*	t	0	r w	0	0	0	0	0	0
B	0	*	0	g	0	0	0	0	0	0
C	0	r	*	0	0	0	0	0	0	0
D	0	0	0	*	0	t	0	0	g	g
E	0	0	0	g	*	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	w	*	0	0	0	0
G	0	0	r w	0	0	0	*	0	0	0
H	0	0	0	0	g	t	0	*	0	0
I	0	0	0	0	0	0	0	r w	*	0
J	0	0	0	0	0	0	0	t	0	*

Рис. 1. Формат входного файла для анализа безопасности компьютерной системы. * — полный набор прав; 0 — нет дуги.

2. ОЗУ: 8 Гб.

3. ОС: Windows 8 x64.

Результаты тестирования приведены в таблице 1 в виде зависимости времени работы каждого алгоритма от количества вершин в исходном графе.

Таблица 1. Результаты тестирования эффективности работы алгоритмов поиска несанкционированных доступов

Количество вершин	18	30	60	120	512	612	712	810	1024
Поиск tg-путей (мс)	1	2	2	4	16	20	29	36	40
Поиск островов (мс)	1	3	6	12	326	703	1556	2711	5475
Поиск мостов (мс)	1	1	4	33	4942	9939	25858	41176	77997

Как видно из таблицы 3, производительность алгоритмов имеет экспоненциальную зависимость от количества вершин, что соответствует теоретическим оценкам, приведённым в [1–4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Бречка Д.М. Алгоритмы анализа безопасности состояний компьютерной системы для модели Take-Grant // Математические структуры и моделирование. 2009. Вып. 20. С. 160–172.
2. Бречка Д.М. Анализ возможности доступа в модели Take-Grant // В мире научных открытий. 2010. № 4 (10). Часть 4. С. 11–13.
3. Проблемы обработки и защиты информации. Книга 1. Модели политик безопасности компьютерных систем / Белим С.В., Белим С.Ю., Бречка Д.М. и др.; под редакцией С.В. Белима. Омск: ООО «ООО Полиграфический центр КАН», 2010. 164 с.
4. Бречка Д.М. Алгоритм поиска мостов типа $\vec{t}^*$ и $\overleftarrow{t}^*$ в графе доступов для дискреционной модели безопасности Take-Grant. // Математические структуры и моделирование. 2011. Вып. 23. С. 99–104.

THE PROGRAM REALIZATION OF ALGORITHMS FOR AN UNAUTHORIZED ACCESS SEARCHING

D.M. Brechka

Ph.D. (Eng.), e-mail: dbrechkawork@yandex.ru

R.A. Isin

Postgraduate Student, e-mail: newshriek@gmail.com

Omsk State University n.a. F.M. Dostoevskiy

Abstract. The article describes the realization of algorithms for an unauthorized access searching in Take-Grant model. The internal structure of software products that implement algorithms, input and output data formats, results of software performance testing is described.

Keywords: algorithm, security, Take-Grant, programming objects implementation.

СИСТЕМА ВЫЯВЛЕНИЯ ИНСАЙДЕРОВ

В.С. Веденеев

ведущий спец-т по информационной безопасности (ОАО «ЧЦЗ»),
e-mail: ingafen@gmail.com

И.В. Бычков

д.ф.-м.н., проф., e-mail: bychkov@csu.ru

Челябинский государственный университет

Аннотация. В статье рассмотрен опыт создания системы выявления инсайдеров на основе самоорганизующихся сетей Кохонена.

Ключевые слова: самоорганизующиеся сети Кохонена, инсайдер.

1. Введение (описание проблемы)

Задача поиска инсайдеров в информационных системах предприятий является одной из основных, стоящих перед службой информационной безопасности. Инсайдер обладает большим набором полномочий для выполнения своих должностных обязанностей, что даёт ему возможность воспользоваться своими полномочиями для нанесения ущерба предприятию.

Ущерб может быть экономическим, репутационным, в некоторых случаях может привести к нарушению работы предприятия (например, в случае вывода из строя серверного или коммутационного оборудования). Выделяют следующие виды инсайдерских атак [1]:

1. Мошенничество
2. Саботаж
3. Кража интеллектуальной собственности.

Выявление инсайдерской атаки, за исключением крайних случаев, представляет собой трудновыполнимую задачу. Необходимо из общего потока информации и событий выделить те, которые являются вредоносными.

Такие события могут соответствовать заранее установленным правилам или паттернам — например: копирование конфиденциальной информации на неучтённые носители, попытки входа под чужим аккаунтом, подбор паролей и т.п. Однако в большинстве случаев инсайдерские атаки представляют собой действия, которые вполне могут показаться легитимными. Отличить в таком случае вредоносные действия от рабочих задач можно лишь в рамках контекста, который можно назвать «нормальной работой». То есть той работы, которую «обычно» делает данный субъект. Построение такого контекста является трудновыполнимой задачей. В большинстве случаев, контекст строится, исходя из эмпирических знаний и опыта.

2. Варианты решений

Одним из первых математических решений была система IDES, разработанная Дороти Деннинг (Dorothy E. Denning) [2]. Система устанавливала профиль активности работы пользователя на ПК. Её система была рассчитана на терминального пользователя, однако, может быть и расширена для обычных пользователей системы.

Разработано большое количество средств защиты информации, направленных на выявление инсайдерских атак. В первую очередь — это DLP-системы (data leakage protection — предотвращение утечек информации). DLP-системы контролируют потоки информации, циркулирующие через ПК, с целью выявления передачи конфиденциальных данных. Функционал DLP-систем достаточно широк. Однако в большинстве случаев DLP-системы могут лишь зафиксировать факт утечки информации. Несмотря на то что DLP-системы обладают функцией блокировки передачи информации, этой опцией пользуются крайне редко. Это связано с тем, что блокировка может существенно снизить скорость информационного обмена предприятия с окружающим миром, т.к. принятие решения специалистом по безопасности о передаче данных после их блокировки занимает некоторое время.

Кроме того, некоторые DLP-системы включают в себя системы мониторинга работы пользователя на ПК — какие программы он запускал, сколько времени провёл в системе и т.д.

Также к системам выявления инсайдеров можно добавить системы Honey-pot, Honey-net и им подобные [3,4]. Honey-pot представляют собой системы, которые представляются сетевыми сервисами, однако, напрямую не используются и открыто не публикуются. Основная их цель — привлечь внимание нарушителя, который проводит разведку внутри сети. Любое обращение к Honey-pot можно рассматривать в качестве инсайдерской атаки. Honey-net представляет собой несколько honey-pot, объединённых в одну сеть.

Таким образом, существует некоторое количество инструментов, которые позволяют выявлять инсайдерские атаки по заранее определённым паттернам или правилам.

Помимо выявления инсайдерских атак крайне перспективным направлением является предсказание инсайдерских атак, а именно — выявление личностей, склонных к инсайдерской деятельности.

3. Предлагаемое решение

В своей работе мы рассмотрели возможность применения самоорганизующихся сетей Кохонена для выявления инсайдеров в корпоративных информационных системах. Выбор сетей Кохонена в качестве математического аппарата системы был сделан по следующим причинам:

1. Сети Кохонена относятся к сетям с «обучением без учителя», что позволяет автоматически строить упомянутый выше контекст.

2. Сети Кохонена способны проводить кластеризацию информации, тем самым проводить автоматическое разбиение элементов на группы.
3. На основе кластеризации удобно производить поиск аномалий.

Основная идея состоит в следующем: на основе мониторинга действий пользователя выявлять аномальную деятельность, деятельность, которая может соответствовать инсайдерской деятельности. На основе этих данных строить портрет/образ пользователя.

Сети Кохонена выступают в двух ролях: во-первых, служат инструментом для выявления аномальной деятельности, во-вторых, служат инструментом для обобщения данных о пользователе.

В программе использована библиотека CUDAfy.NET для работы с графическими адаптерами, произведёнными компанией NVidia, NoSQL база данных Redis. Redis был выбран в связи с высокой скоростью работы. Основным его ограничением является тот факт, что при работе база данных выгружается в ОЗУ. В связи с этим в будущем при использовании больших массивов данных Redis будет использоваться в качестве кэширующей базы данных, а в качестве основной будет использоваться одна из «традиционных» реляционных баз данных.

Графический интерфейс программы выполнен с использованием технологии WPF (Windows Presentation Foundation) и паттерна MVVM (Model-View-ViewModel). Использование паттерна MVVM дало возможность быстро перестраивать графический интерфейс при изменении логики программы. Это дало возможность изучать сети Кохонена в интерактивном режиме, а также подбирать оптимальный способ обнаружения аномальных действий пользователя.

На текущий момент реализован поиск аномалий среди веб-активности пользователя (посещение интернет-сайтов), авторизационных данных (входах/выходах из системы), запускаемых процессов и программ, активность работы с файловой системой. Данные вводятся в программу вручную.

В связи с тем, что получение реальных инсайдерских данных — это трудно-выполнимая задача, то проверка работоспособности системы производится на уровне интеграционных тестов.

Ближайшие планируемые работы — расширение областей, среди которых ведётся поиск аномалий, а также — построение слоя для обобщения данных и непосредственно — построения портрета пользователя.

4. Заключение

Использование сетей Кохонена для поиска инсайдеров в корпоративных информационных системах является перспективным направлением, требующим проработки при создании реальных систем. Сети Кохонена имеют большой потенциал распараллеливания, что позволяет добиться высокой производительности всей системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cappelli D.M., Trzeciak R.F., Floodeen R. The Key to Successful Monitoring for Detection of Insider Attacks.
2. Denning D. An Intrusion-Detection Model // IEEE Transaction on Software Eng. 1987. Feb. C. 222–232.
3. Even L.R. Intrusion Detection FAQ: What is a Honeypot? 2010. July. URL: <http://www.sans.org/security-resources/idfaq/honeypot3.php>
4. Spitzner L. Honeypots: Catching The Insider Threat // Computer-Security Application Conference. Proceesings, 19th Annual. 2003.

INSIDER DETECTION SYSTEM

Victor S. Vedeneev

Postgraduate Student, e-mail: ingafen@gmail.com

Igor V. Bychkov

Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, e-mail: bychkov@csu.ru

Chelyabinsk State University

Abstract. Insider detection system based on Kohonen self-organizing neural network is described in this work.

Keywords: Kohonen self-organizing neural network, insider.

ОПТИМАЛЬНЫЙ ПОДБОР АНТИВИРУСНОЙ ПРОГРАММЫ И МЕЖСЕТЕВОГО ЭКРАНА С ПОМОЩЬЮ ТЕОРИИ ИГР

Т.В. Вахний

доцент, к.ф.-м.н., e-mail: vahniyvtv@mail.ru

А.К. Гуц

профессор, д.ф.-м.н., e-mail: aguts@mail.ru

С.Ю. Кузьмин

студент, e-mail: sergkuz2@gmail.com

Факультет компьютерных наук, Омский государственный университет
им. Ф.М. Достоевского

Аннотация. Описывается применение теоретико-игрового подхода к поиску наиболее оптимального набора программных средств защиты компьютерных информационных ресурсов на примере подбора антивирусной системы и межсетевого экрана.

Ключевые слова: оптимальный набор средств защиты, защита информации, теория игр.

Введение

Работа в глобальной сети Интернет связана с постоянными угрозами информационной безопасности. Компьютерные системы предприятий и организаций очень часто становятся объектами, на которые направлены помыслы злоумышленников. Посредством компьютерной атаки можно либо уничтожить систему, либо временно ограничить доступ к ней. В любом случае предприятия несут как финансовые потери, так и моральные, как, например, банки, уровень доверия к которым падает, если они стали жертвами атаки хакеров.

Атаки на информационные ресурсы могут быть самыми разнообразными: от несанкционированного проникновения до заражения системы вирусами. Для защиты данных от вредоносных программ и внешних хакерских атак, использующих уязвимости в программном обеспечении, необходимы, прежде всего, антивирусная система и межсетевой экран. Использовать антивирусную систему со встроенным персональным межсетевым экраном не всегда оказывается предпочтительным решением. В таких случаях становится актуальным вопрос подбора антивирусной системы и межсетевого экрана.

Современные антивирусные системы и межсетевые экраны обладают большим количеством разнообразного функционала и инструментария для решения задач защиты данных, при этом у них могут частично совпадать функциональные возможности. Администратору безопасности среди всего разнообра-

зия представленных на рынке программных продуктов приходится принимать субъективные решения, основываясь лишь на изучении их описания.

В данной работе предлагается применить теоретико-игровой подход к подбору наиболее оптимального набора антивирусной системы и межсетевого экрана. Важно отметить, что теория игр в последние годы интенсивно используется в исследованиях по организации систем защиты компьютерных информационных ресурсов от внешних угроз [1].

1. Постановка задачи и игровой подход

Для поиска наиболее оптимальных стратегий защиты информационных ресурсов была проведена математическая игра двух игроков [1–3], одним из которых являлась система защиты компьютерной информации, а другим — возможные угрозы безопасности информации. Поскольку целью данной работы являлось определение оптимальной стратегии защиты (такого набора программных продуктов, который обеспечит сведение к минимуму ущерба, нанесённого компьютерной системе), то можно считать, что возможные угрозы злоумышленника направлены на нанесение наибольшего ущерба компьютерной системе. При таком предположении выигрыш хакера будет равен проигрышу администратора безопасности, и можно рассматривать матричную игру двух лиц с нулевой суммой.

В качестве стратегий администратора безопасности будем понимать строки x_i ($i = 1, \dots, n$) (различные средства защиты компьютерной информации) некоторой матрицы (табл. 1), а в качестве стратегий злоумышленника — её столбцы y_j ($j = 1, \dots, m$) (возможные угрозы безопасности информации). К стратегиям также можно отнести различные сочетания из угроз и различные сочетания средств защиты. Прекращение использования или добавление новой угрозы или средства защиты можно рассматривать как переход от одной стратегии к другой.

Построив игровую матрицу (табл. 1) и проанализировав её, можно заранее оценить процент возможного пропуска угроз и затраты каждого решения по защите компьютерной информации. Проведение матричной игры позволит определить наиболее эффективные варианты для всего диапазона угроз.

Таблица 1. Таблица матричной игры

		y_1	y_2	...	y_m
x_1	$p(x_1)$	a_{11}	a_{12}	...	a_{1m}
x_2	$p(x_2)$	a_{21}	a_{22}	...	a_{2m}
...	...	...	...	...	...
x_n	$p(x_n)$	a_{n1}	a_{n2}	...	a_{nm}

Для проведения на компьютере игры А надо также знать результаты игры при каждой паре стратегий x_i и угроз y_j (например, a_{ij} — причинённый ущерб)

и вероятности реализации $p(y_j)$ каждой угрозы y_j .

В данной работе коэффициенты матрицы a_{ij} определяли, учитывая только те угрозы, которые пропускались, т.е. не отражались соответствующими средствами защиты. Для определения коэффициентов матрицы игры между угрозами и средствами защиты было протестировано прохождение пакета из 15 тысяч угроз через различные антивирусные системы и межсетевые экраны. Вероятность реализации каждой угрозы $p(y_j)$ определялась как отношение количества угроз данного типа к количеству всех угроз в пакете.

Наилучшей в условиях имеющейся информации об угрозах считалась стратегия системы защиты компьютерной информации, т. е. набор средств защиты, для которой будет минимальна сумма

$$\sum_{j=1}^m a_{ij}p(y_j).$$

В расчётах для каждой стратегии в качестве коэффициента a_{ij} выбирается наименьший из коэффициентов для соответствующих программных средств защиты информации в отдельности.

2. Матрица игры

Для определения коэффициентов матрицы игры между угрозами и антивирусными системами было протестировано прохождение пакета из 15 тысяч угроз через различные антивирусные системы. В таблице 2 представлены полученные результаты. На пересечении каждой строки и столбца стоит число пропущенных угроз соответствующей антивирусной системой.

Таблица 2. Результаты расчета вероятности угроз

	Вирусы	Spyware	Adware	Malware	Баннер	Веб-угрозы	Фишинг	Трояны	Черви
Kaspersky Antivirus		3				5	2		3
McAfee Antivirus			3		2			3	
Avast Pro Antivirus	5			2		5			4
Eset Nod 32		5					2		1
Panda Antivirus		2			3			1	

Вероятность реализации каждой угрозы в данной работе определялась как отношение количества угроз данного типа к количеству всех угроз в пакете. В таблице 3 приведены полученные значения для всех возможных угроз в пакете.

Поскольку установить сразу несколько антивирусных систем одновременно нельзя, то лучшей будет та, которая пропустит меньшее число угроз. Такой

антивирусной системой оказалась McAfee Antivirus. Аналогично были определены коэффициенты матрицы игры между угрозами и межсетевыми экранами (см. табл. 4). Наименьшее число угроз среди рассмотренных межсетевых экранов пропустил Kaspersky Internet Security.

После составления общей матрицы игры, в которой стратегиями администратора безопасности были антивирусные системы и межсетевые экраны, и проведения матричной игры, наиболее оптимальным набором оказались антивирусная система Eset Nod 32 и межсетевой экран Kaspersky Internet Security. Дальнейшее дополнение матрицы другими видами угроз и средствами защиты позволит подобрать наиболее оптимальный набор из большего числа программных средств защиты.

Таблица 3. Результаты расчета вероятности угроз

		y_1	y_2
Вирусы	13%	Веб-угрозы	13%
Spyware	12%	Фишинг	9%
Adware	10%	Трояны	16%
Maleware	9%	Черви	8%
Баннеры	10%		

Таблица 4. Число пропущенных угроз межсетевыми экранами

	Вирусы	Spyware	Adware	Maleware	Баннер	Веб-угрозы	Фишинг	Трояны	Черви
Kaspersky Internet Security			3		4		2		
McAfee Internet Security	1		3					3	
Avast Internet Security				2		5	2		4
Eset Smart Security	1		4	3		2			1
Panda Internet Security				3	3				5

3. Интерфейс реализованного программного приложения

На основе описанного подхода было создано программное приложение, которое по введенным значениям стоимости средств защиты, проценту проникновения угроз и величинам вероятностей их реализации вычисляет оптимальный набор средств защиты из имеющихся в распоряжении администратора безопасности программных продуктов. В реализованном приложении предусмотрено

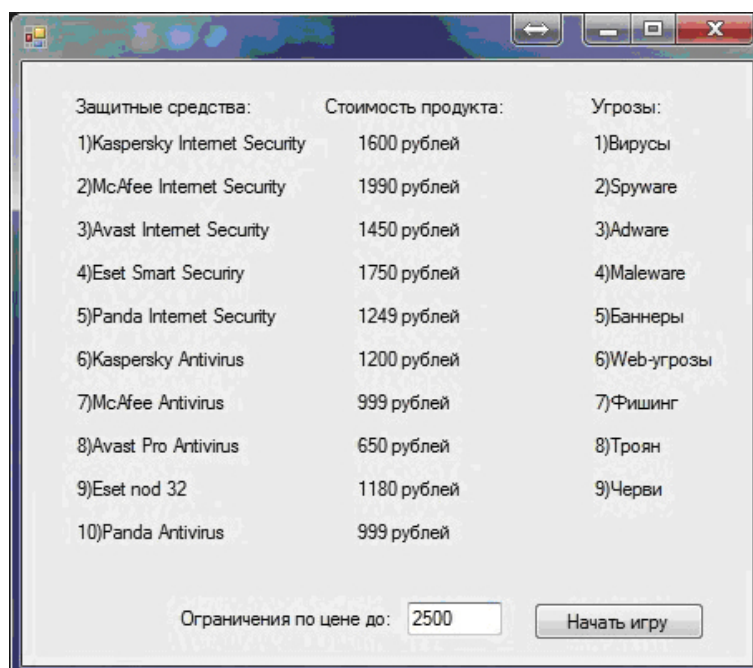


Рис. 1. Интерфейс начального окна приложения

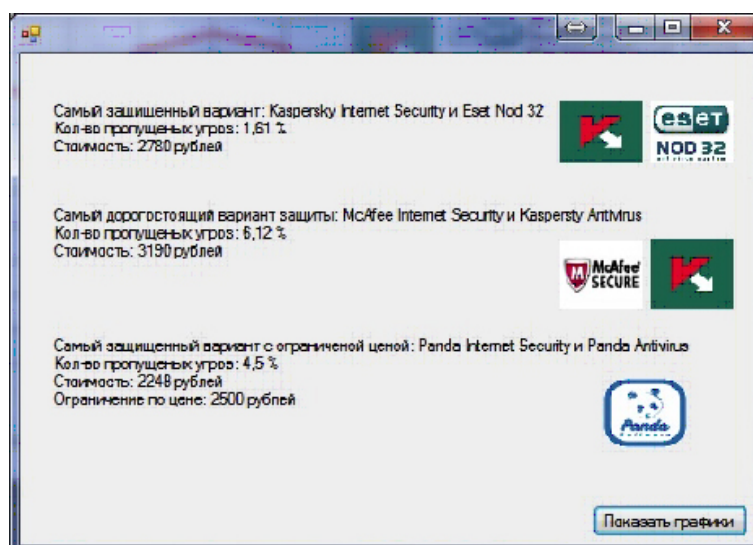


Рис. 2. Окно приложения с результатом игры

нахождение оптимального набора с возможностью ограничения по стоимости программного обеспечения (рис. 1).

Применение предложенного программного продукта позволяет находить наиболее оптимальный набор средств защиты компьютерной информации и анализировать полученные результаты. На рис. 2 показаны результаты расчётов наилучшей пары при выборе из антивирусных систем и межсетевых экранов.

Реализованное приложение позволяет более детально просмотреть результа-

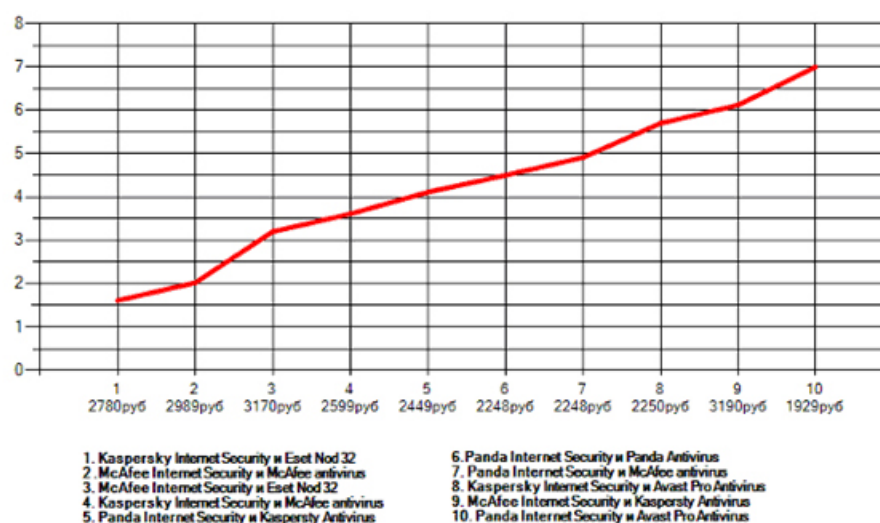


Рис. 3. Результаты анализа проникновения угроз для 10 лучших решений

ты проведённых расчётов для десяти наиболее оптимальных решений (рис.3).

Приложение было разработано на языке программирования C# для операционной системы Windows. В реализованном приложении предполагается дополнение матрицы другими видами угроз и средствами защиты. В случае нескольких решений предпочтение отдаётся более дешёвому набору программных продуктов.

4. Заключение

Применение предложенного в данной работе программного продукта даст администратору безопасности возможность выбрать наиболее оптимальный набор средств защиты компьютерной информации, а также оценить эффективность уже используемого программного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вахний Т.В., Гуц А.К. Теория игр и защита компьютерных систем: Учебное пособие. Омск: Изд-во ОмГУ, 2013. 160 с.
2. Вахний Т.В., Гуц А.К. Теоретико-игровой подход к выбору оптимальных стратегий защиты информационных ресурсов // Математические структуры и моделирование. 2009. № 19. С.104-107.
3. Вахний Т.В., Гуц А.К., Константинов В.В. Программное приложение для выбора оптимального набора средств защиты компьютерной информации на основе теории игр // Вестник Омского университета. 2013. № 4 (70). С. 201-206.

OPTIMAL SELECTION OF THE ANTIVIRUS PROGRAM AND THE FIREWALL BY MEANS OF THE GAME THEORY

T.V. Vahniy

Associent Professor, Ph.D. (Phys.), e-mail: vahniytv@mail.ru

A.K. Guts

Associent Professor, Ph.D. (Phys.), e-mail: aguts@mail.ru

S.Yu. Kuzmin

Student), e-mail: sergkuz2@gmail.com

Omsk State University n.a. F.M. Dostoevskiy

Abstract. Application of the game theory approach to search for the most optimal set of defence computer system software is described on the example of antivirus system and firewall selection.

Keywords: optimal selection of software, game theory, information defence.

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ БЕСПРОВОДНЫХ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СЕТЕЙ

Д.А. Москвин

кандидат технических наук, доцент, e-mail: moskvin@ibks.ftk.spbstu.ru

Д.В. Иванов

аспирант, e-mail: 9361023@gmail.com

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Аннотация. Рассматривается безопасность беспроводных самоорганизующихся сетей, исследована и проанализирована атака «Чёрная дыра», направленная на нарушение работоспособности таких сетей, а также приведены рекомендации по борьбе с ней.

Ключевые слова: самоорганизующиеся сети, ad-hoc, mesh, безопасность, атака.

Международный опыт последних лет показывает, что привычная ИТ-инфраструктура в любой момент может дать сбой, обусловленный совершенно разными причинами. После этого связь определённого сегмента с остальной сетью теряется. Например, на Гаити после землетрясения в 2010 году главным средством связи стали спутниковые телефоны, предоставленные в качестве помощи. Использование таких телефонов стало скорее вынужденной мерой, а не эквивалентной альтернативой существующим средствам связи. Основная проблема в том, что не только природные катаклизмы способны вывести из строя современную инфраструктуру, но и банальное отключение электропитания способно превратить наши мобильные устройства и компьютеры в «бесполезные игрушки» [1, с. 297].

Адекватной реакцией на такие проблемы является растущий интерес к идее создания беспроводной самоорганизующейся (или динамической, ad-hoc) сети. Беспроводные самоорганизующиеся сети — децентрализованные сети, не имеющие постоянной структуры. Клиентские устройства соединяются «на лету», образуя между собой сеть. Каждый узел сети может являться посредником в передаче данных, предназначенных другим узлам. При этом поиск получателя данных производится динамически, на основании текущей связности сети. Данная особенность беспроводных самоорганизующихся сетей является их основным отличием от проводных сетей и управляемых беспроводных сетей, в которых задачу управления потоками данных выполняют маршрутизаторы (в проводных сетях) или точки доступа (в управляемых беспроводных сетях). Такая сеть способна формировать сама себя каждый раз, когда специальным образом запрограммированные мобильные устройства (телефоны, планшеты,

ноутбуки и др.) оказываются в пределах прямого доступа. Каждое из таких устройств исполняет роль и приёмника, и передатчика, а также является ретранслятором для других устройств в сети. Устройства, расстояние между которыми превышает дальность прямого доступа, могут поддерживать между собой связь посредством других устройств в сети, образуя, таким образом, подобие цепочки из узлов, где каждый из них передаёт информацию своему соседу [2, с. 43].

Использование самоорганизующихся сетей будет полезно не только в случае стихийных бедствий. Такие сети будут также востребованы в случае, если возведение стационарной базы является слишком дорогостоящим, долгим или трудоёмким процессом. Например, удалённые поселения, возведение в которых стационарных баз не планируется, смогут получить доступ в сеть Интернет посредством беспроводных самоорганизующихся сетей. Другой пример — при организации «умного» дома все домашние устройства смогут передавать информацию друг другу, освобождая от необходимости прокладки дополнительных проводов и объединяя всю домашнюю технику в один удобный комплекс. Также сети подобного класса широко применяются военными ведомствами разных стран для организации оперативной связи в тактических целях, например, во время проведения антитеррористических операций, в зонах локальных военных конфликтов.

Плюс ко всему вышеперечисленному, в последнее время получили распространение телекоммуникационные сети передачи данных, организованные в соответствии с топологией самоорганизующихся сетей. Масштабы таких проектов увеличились до сотен тысяч пользователей по всему миру. Сети с динамической организацией предоставляют наиболее практичные решения, интегрирующие различные беспроводные технологии. Возможность организации с помощью динамической топологии локальных и городских (LAN и MAN) сетей, легко интегрируемых в глобальные сети (WAN), является хорошей перспективой для операторов связи, разворачивающих свои сети в мегаполисах, и это ещё раз подтверждает релевантность и актуальность использования самоорганизующихся сетей.

Известные атаки на сети с динамической организацией на самом верхнем уровне делятся на пассивные и активные. Пассивные атаки преследуют лишь цель прослушивания и перехвата передающейся в сети информации (нарушение конфиденциальности), что делает их крайне тяжёлыми для обнаружения. Активные атаки, в свою очередь, направлены на непосредственное взаимодействие с информацией в сети: изменение или скрытие пакетов данных является основной целью таких атак (нарушение целостности и доступности). Также различают атаки внешние (организует внешний нарушитель) и внутренние (внутренний нарушитель).

Наиболее специфичной для самоорганизующихся сетей является атака «Чёрная дыра». Она заключается в том, что устройство-злоумышленник маскируется под узел сети, через который проходит кратчайший путь к узлу, информацию от и для которого злоумышленник хочет получить. На самом деле узел-злоумышленник может быть вообще не связан с узлом-жертвой в рамках

сети.

Традиционным методом решения проблем безопасности в беспроводных самоорганизующихся сетях является использование шифрования на прикладном уровне, что не всегда удобно, требует лишних затрат ресурсов, а также не защищает от угроз, направленных на доступность информации. Поэтому для обеспечения безопасности сетей с динамической организацией необходимо применять специфические методы защиты.

Многие протоколы взаимодействия в сетях с динамической организацией используют следующий механизм для нахождения оптимального пути до узла цели: узел-инициатор посылает широковещательный RREQ-запрос, который запускает процедуру поиска кратчайшего маршрута. Каждый последующий узел сети передаёт RREQ-запрос дальше по цепочке, пока он не дойдёт до узла-цели. Узел-цель ответит RREP-ответом, который будет передан в обратном направлении через те же узлы, что и RREQ-запрос [3, с. 2].

Атака «Чёрная дыра» реализуется за счёт того, что узел-злоумышленник может, получив RREQ-запрос, не смотря на своё положение относительно узла-цели, передать обратно RREP-ответ, так, как будто именно через него проходит оптимальный маршрут, при этом злоумышленник не обязательно находится на оптимальном пути между узлом-инициатором связи и узлом-целью.

У каждого узла сети, в контексте реактивных протоколов, существует собственный номер последовательности, который изменяется лишь в двух случаях, как это описывается в стандарте RFC 3561 [4, с. 11].

Для защиты от атаки «Чёрная дыра», которая была описана ранее, можно использовать следующий метод. Все узлы в сети должны хранить таблицу номеров последовательностей всех узлов, от которых были приняты данные. Для этого при инициализации сети все участники обмениваются друг с другом Hello-сообщениями. При запуске процедуры поиска маршрута узел-инициатор отправляет RREQ-запрос, на который узел-цель или промежуточный узел с «freshenough» маршрутом должен отправить источнику номер последовательности, с которым он в последний раз контактировал с узлом-целью.

Затем промежуточный узел (узел проверки) сравнивает разницу между номером последовательности, отправленным узлом с «fresh-enough» маршрутом и номером последовательности, с которым он сам последний раз взаимодействовал с узлом-целью. Если это значение превышает заранее оговорённую величину L , то узел, отправивший этот RREP, вероятно, является злоумышленником.

Величина L измеряется статистическим образом для каждой целевой сети и представляет из себя среднее значение разности между номером последовательности, отправленным узлом с «fresh-enough» маршрутом, и номером последовательности, с которым узел проверки сам последний раз взаимодействовал с узлом-целью.

Для оценки предложенного метода построен макет MANET-сети. Программная реализация макета осуществляется с помощью средств языка программирования Java. Упрощенная схема генерируемого программой макета представлена на рисунке 1.

Смоделированная сеть работает следующим образом: на участке размером 1000 на 1000 метров случайным образом генерируются узлы сети путём задачи каждому из них уникальной пары координат (double x,y). Количество узлов равно 25.

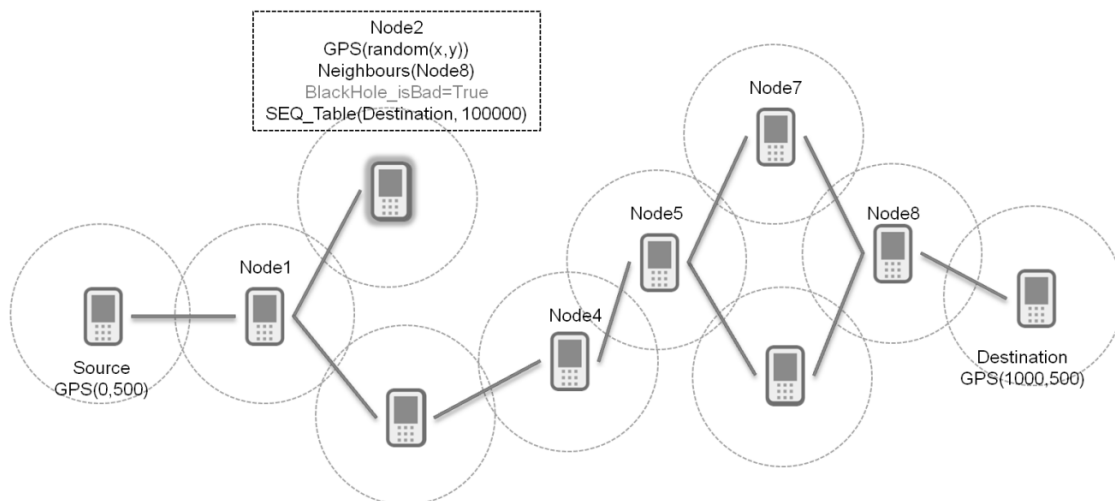


Рис. 1. Упрощённая схема макета сети из 10 узлов на плоскости 1000 × 1000 метров

После этого узлы проверяют связанность с соседями и объединяются с ними каналами связи. Связанность с соседями проверяется путём сравнения расстояния между узлами на двумерной плоскости и радиуса охвата технологии передачи данных. Для простоты радиус охвата в макете принят за 150 метров. Эта величина может легко быть изменена.

Также в макете сети задаются узел-источник (source) и узел-получатель (destination) между которыми налаживается связь.

Некоторые из узлов генерируются как узлы, обладающие `freshenough` маршрутом до узла-получателя.

Один узел сети гарантированно назначается в макете нарушителем в зависимости от моделируемой атаки (`BlackHole_isBad=true`).

Прежде чем говорить об оценке метода защиты от атаки «Чёрная дыра», нужно затронуть вопрос выбора оптимального значения лимита разницы между номерами последовательности узлов.

Суть заключается в том, что взяв за лимит очень маленькое значение разности, мы обезопасим себя от пропуска атак (ошибок первого рода), но будем вынуждены терпеть большое количество ложных срабатываний, так как разность номеров последовательности очень часто будет превышать лимит. Взяв за значение лимита слишком большое число, доля ложных срабатываний будет стремиться к нулю, но количество пропусков атаки возрастёт.

Таким образом, метод должен настраиваться на конкретной целевой системе для поиска баланса между долями ошибок первого и второго рода. Стоит

заметить, что баланс не фиксирован и зависит от конкретных предпочтений и приоритетов сети: если сеть терпима к ложным срабатываниям, то стоит отдать предпочтение уменьшению доли пропуска атак и значение лимита стоит искать левее точки, обозначенной на рисунке. С другой стороны, если сеть не может позволить себе слишком часто блокировать узлы, ложно обвинённые в атаке, то стоит искать значение лимита, как показано на рисунке 2. И в третьем, самом редком случае, когда отсутствие ложных срабатываний важнее отсутствия пропусков атаки, стоит искать значение лимита правее точки отмеченной на рисунке.

В результате многочисленных проверок было выявлено, что оптимальным лимитом для разности номеров последовательности получателя является 11 000. Здесь лимит высчитан для нейтральной ситуации, где нет предпочтений между ошибками первого и второго рода.

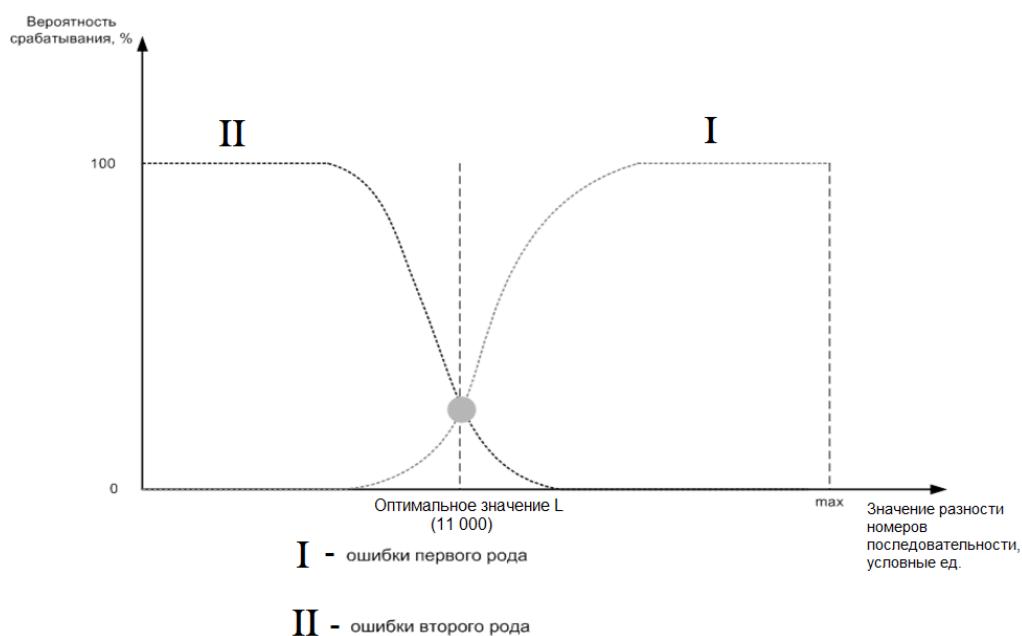


Рис. 2. График изменения доли ошибок первого и второго рода в зависимости от значения лимита

Результат тысячи испытаний создания уникального макета и оценки на нем метода защиты от атаки «Черная дыра» показал следующие результаты, отраженные на рисунке 3.

Из 1000 испытаний 834 сценария были легитимными, в 24 случаях из них происходили ложные срабатывания. 166 сценариев прошли как атакующие, и лишь в 7 случаях был зарегистрирован пропуск атаки.

Доля ошибок первого рода (пропуск атаки) составила 4%, В свою очередь доля ошибок второго рода (ложное срабатывание) составила 3%, что является хорошим показателем.

Таким образом, технология беспроводных самоорганизующихся сетей является перспективным и актуальным для исследований направлением. В свою



Рис. 3. Результаты тысячи испытаний метода защиты от атаки «Черная дыра»

очередь существование атак на подобные сети делает технологию важной для изучения с точки зрения информационной безопасности. Разработчики mesh-сетей изначально предусмотрели использование механизмов защиты, но основную угрозу они видели во внешней среде — в Интернете и в других внешних нарушителях. И это отлично работало, когда mesh-сети использовались локально, для решения узкого круга зачастую кратковременных задач, и в них присутствовало фиксированное множество доверенных узлов. Однако в последнее время вследствие роста количества и масштаба mesh-сетей на доверие ко всем узлам рассчитывать уже не приходится — появилась угроза внутреннего нарушителя, к которому mesh-сети оказались не готовы. Поэтому для дальнейшего развития и использования WMNs необходима разработка новых технологий и средств для их защиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Москвин Д.А., Иванов Д.В. Исследование безопасности беспроводных самоорганизующихся сетей // Информация и безопасность. Воронежский государственный технический университет, 2014.
2. Кучерявый А.Е., Прокопьев А.В., Кучерявый Е.А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: Любавич, 2011.
3. Om Sh., Talib M. Wireless Ad-hoc Network under Black-hole Attack // International Journal of Digital Information and Wireless Communications. С. 591–596.
4. Сайт "ietf". Электрон. дан. 2003. URL: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt/> (дата обращения: 10.05.2014).

DEVELOPMENT AND ASSESSMENT OF WIRELESS SELF-ORGANIZING NETWORKS CYBER SECURITY METHODS

D.A. Moskvin

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, e-mail: moskvin@ibks.ftk.spbstu.ru

D.V. Ivanov

Postgraduate Student, e-mail: 9361023@gmail.com

St.Petersburg State Polytechnic University

Abstract. The article considers rapidly developing technology of self-organizing wireless networks. "Blackhole" attack targeting security breach of such networks is investigated and analyzed. The recommendations for defending from such attack are provided.

Keywords: self-organization, network, ad-hoc, mesh, security, attack.

ОЦЕНКА ЗАЩИЩЁННОСТИ СВТ ПУТЁМ МОДЕЛИРОВАНИЯ КАНАЛА ПЭМИН

Л.С. Носов

доцент, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой информационной безопасности,
e-mail: nosov@syktsu.ru

Институт точных наук и информационных технологий, Сыктывкарский
государственный университет

Аннотация. В работе приведён подход к оценке защищённости СВТ путём математического моделирования распространения электромагнитных волн от СВТ.

Ключевые слова: ПЭМИН, оценка защищённости, технические каналы утечки информации.

Введение

Побочные электромагнитные излучения и наводки (ПЭМИН), создаваемые СВТ (например, узлами и схемами блоками ПЭВМ, коммуникационным и офисным оборудованием), наводятся на сигнальные кабельные линии, линии электропитания и заземления и могут распространяться по ним на большие расстояния. Наводки, если они достаточно высокого уровня, могут также переизлучаться. Наибольшую опасность утечки информации через ПЭМИН представляют узлы и устройства ПЭВМ, обрабатывающие информацию в последовательном коде (VGA, USB, SATA и др.).

1. Оценка защищённости по каналу ПЭМИН

Согласно действующим нормативно-методическим документам при проведении специальных исследований требуется измерение информативного сигнала по каналу ПЭМИН. Такие излучения составляют лишь малую долю от всего спектра излучений технического средства. Все прочие излучения не должны фиксироваться при измерениях. Для того чтобы выделить информационный ПЭМИН, на исследуемом техническом средстве предусматривают специальные тестовые режимы его работы. Требования к тестам определяются в соответствующих ГОСТ и методиках. В соответствии с методикой проведения специальных исследований технических средств по измерению их собственного электромагнитного излучения проводятся следующие операции:

1. Контролируемое устройство включается в тестовый режим.

2. На определённом расстоянии (обычно 1 м) от устройства устанавливаются поочерёдно антенны для приёма электрической и магнитной составляющих поля, излучаемого анализируемым устройством.
3. Электрический сигнал с выхода антенны подаётся на вход приёмно-регистрирующего измерительного устройства, с помощью которого по результатам измерений по определённой методике производится расчёт опасных зон [1].

Практически все методики сводятся к разделению канала ПЭМИН на три зоны: ближнюю, промежуточную и дальнюю. Они исходят из аппроксимации зависимостей уровня информативного сигнала от расстояния зависимостями $1/r$, $1/r^2$ и $1/r^3$ и «стыковки» этих зависимостей на границах соответствующих зон. Современный уровень развития вычислительной техники позволяет производить более точное моделирование канала ПЭМИН.

2. ПЭМИН как канал распространения электромагнитной волны

Рассмотрим элементарный электрический излучатель (диполь Герца) в сферической системе координат [1] (Рис. 1).

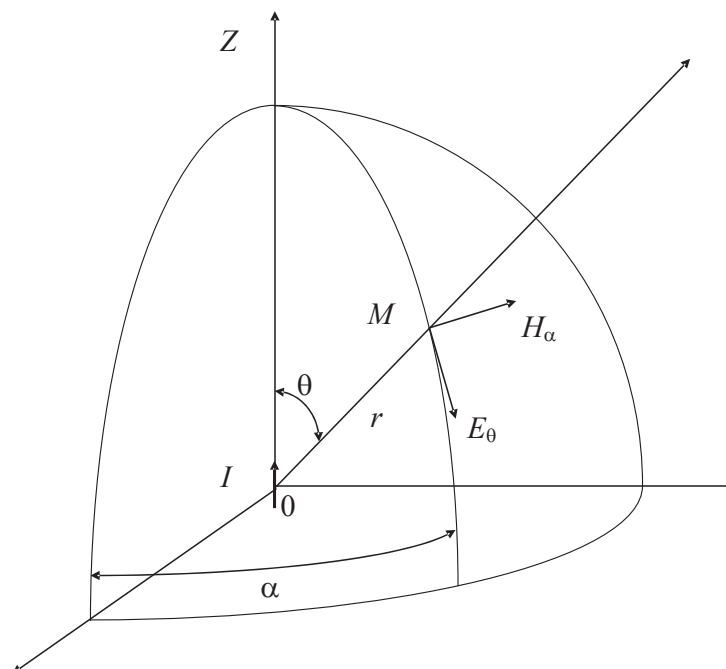


Рис. 1. Элементарный электрический диполь в сферической системе координат [1]

Зависимость электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля от времени и расстояния может быть определена как:

$$H_\alpha = \frac{klI_m}{4\pi r} \left[\frac{1}{kr} \cos(\omega t - kr) - \sin(\omega t - kr) \right] \sin(\vartheta);$$

$$E_r = \frac{klI_m}{2\pi\omega\epsilon r^2} \left[\frac{1}{kr} \sin(\omega t - kr) + \cos(\omega t - kr) \right] \cos(\vartheta);$$

$$E_\vartheta = \frac{k^2 l I_m}{4\pi\omega\epsilon r} \left[\left(\frac{1}{k^2 r^2} - 1 \right) \sin(\omega t - kr) + \frac{1}{kr} \cos(\omega t - kr) \right] \sin(\vartheta);$$

$$H_r = H_\vartheta = E_\alpha = 0;$$

где: k — волновой вектор, l — размеры электрического диполя, I_m — амплитуда колебаний тока в диполе, ϵ — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды.

Не трудно показать, что амплитуда напряжённости электрической E_m и магнитной H_m составляющих электромагнитного поля, которые измеряются с использованием электрических и магнитных антенн будут иметь вид:

$$E_m = \frac{klI_m}{4\pi\omega\epsilon r} \sqrt{\left(\frac{3}{k^2 r^4} + \frac{5}{r^2} \right) \cos^2(\vartheta) + k^2 \sin^2(\vartheta) + \frac{1}{k^2 r^4} - \frac{1}{r^2}};$$

$$H_m = \frac{klI_m}{4\pi r} \sqrt{\frac{1}{k^2 r^2} + 1} \cdot \sin(\vartheta).$$

Параметры электрического диполя, стоящие перед корнем в уравнениях для E_m и H_m , могут быть определены из измерений электрической и магнитной составляющей электромагнитного поля канала ПЭМИН. Таким образом, оценка защищённости СВТ по каналу ПЭМИН может быть сведена к численному решению уравнений вида $E_m = E_n$ и $H_m = H_n$, где величины E_n и H_n определяются нормативно-методическими документами из соотношения «сигнал/шум» [1].

Заключение

В работе предложен подход к оценке защищённости СВТ по каналу ПЭМИН путём численного решения уравнений для электромагнитных волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др. Технические средства и методы защиты информации. М.: Машиностроение, 2009. 508 с.

ESTIMATION OF SECURITY BY MODELING THE TEMPEST CHANNEL OF COMPUTER

L.S. Nosov

Associate Professor, Ph.D. (Math.), Head of Department of Information Security,
e-mail: nosov@syktsu.ru

Syktyvkar State University

Abstract. The paper presents a security assessment approach to computer by mathematical modeling of electromagnetic waves from computer.

Keywords: tempest, estimation of security, technical channels of information leakage.

Научный журнал

Математические структуры и моделирование

№4(32)

Главный редактор

А.К. Гуц

Выпускающий редактор

Д.Н. Лавров

Технический редактор

Н.Ф. Богаченко

Корректор:

И.Н. Баловнева

Корректоры переводов:

Е.А. Илюшечкин

А.Н. Кабанов

Адрес научной редакции

Россия, 644077, Омск, пр. Мира, 55А

Омский государственный университет

E-mail: guts@omsu.ru, lavrov@omsu.ru

Электронная версия журнала:

<http://msm.univer.omsk.su>

<http://msm.omsu.ru>



Подписано в печать 24.12.2014. Формат 60 × 84 1/8.

Усл. печ. л. 31,5. Тираж 125 экз. Заказ № 246.

Отпечатано на полиграфической базе издательства ОмГУ им. Ф.М. Достоевского
644077, г. Омск, пр. Мира, 55А

ISSN 2222-8772



9 772222 877005

14032 >

