

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

12(208)
2013

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

УЧРЕДИТЕЛЬ
Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Кулагин В. П., Цветков В. Я. Геознание: представление и лингвистические аспекты 2

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Лакаев А. С. Контекстные технологии — новое направление развития информационных технологий анализа текстовой информации 10

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

Четырбоцкий А. Н. Численное 2D-моделирование теплового потока в верхней мантии Земли 17

Валева А. Ф., Гончарова Ю. А., Кошечев И. С. Разработка логистической транспортной системы для решения задачи доставки груза различным клиентам. Часть 1. 23

Елгаренко Е. А. Формирование коллективных предпочтений в многокритериальных задачах 28

Субботин С. А. Выделение обучающих выборок для построения диагностических моделей на основе методов вычислительного интеллекта 36

Струченков В. И. О различных подходах к автоматизации проектирования трасс линейных сооружений 41

Юлюгин Е. А., Речистов Г. С., Плоткин А. Л. Моделирование нагрузки на сетевое оборудование. Изучение влияния топологии сети на производительность приложений молекулярной динамики 48

КОДИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

Дворников С. В., Дворников С. С., Спиринов А. М. Синтез манипулированных сигналов на основе вейвлет-функций 52

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Антонов А. В., Сальников Н. Л., Хромова М. О., Чепурко В. А. Об одной оценке показателей надежности восстанавливаемых технических систем 56

ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ И СИСТЕМЫ

Власов В. А. Метод расширенной интеграции элементов управления в графических приложениях 62

Указатель статей, опубликованных в журнале "Информационные технологии" в 2013 году 67

Указатель приложений к журналу "Информационные технологии" в 2013 году . . 70

Contents 71

Приложение. Актуальные вопросы автоматизированного проектирования: моделирование, оптимизация, обработка информации

Главный редактор:
СТЕМПКОВСКИЙ А. Л.,
акад. РАН, д. т. н., проф.

Зам. главного редактора:
ДИМИТРИЕНКО Ю. И.,
д. ф.-м. н., проф.
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с.н.с.

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

Редакционная коллегия:
АВДОШИН С. М., к. т. н., доц.
АНТОНОВ Б. И.
БАРСКИЙ А. Б., д. т. н., проф.
ВАСЕНИН В. А., д. ф.-м. н., проф.
ГАЛУШКИН А. И., д. т. н., проф.
ДОМРАЧЕВ В. Г., д. т. н., проф.
ЗАГИДУЛЛИН Р. Ш., к. т. н., доц.
ЗАРУБИН В. С., д. т. н., проф.
ИВАННИКОВ А. Д., д. т. н., проф.
ИСАЕНКО Р. О., к. т. н., с.н.с.
КАРПЕНКО А. П., д. ф.-м. н., проф.
КОЛИН К. К., д. т. н., проф.
КУЛАГИН В. П., д. т. н., проф.
КУРЕЙЧИК В. М., д. т. н., проф.
КУХАРЕНКО Б. Г., к. ф.-м. н., доц.
ЛЬВОВИЧ Я. Е., д. т. н., проф.
МАЛЬЦЕВ П. П., д. т. н., проф.
МИХАЙЛОВ Б. М., д. т. н., проф.
НЕЧАЕВ В. В., к. т. н., проф.
ПАВЛОВ В. В., д. т. н., проф.
РЯБОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
СОКОЛОВ Б. В., д. т. н., проф.
УСКОВ В. Л., к. т. н. (США)
ФОМИЧЕВ В. А., д. т. н., проф.
ЧЕРМОШЕНЦЕВ С. Ф., д. т. н., проф.
ШИЛОВ В. В., к. т. н., доц.

Редакция:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЛЫСЕНКО А. В.
ЧУГУНОВА А. В.

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://novtex.ru/IT>.

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования.

Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

УДК 04.82; 528.4

В. П. Кулагин, д-р техн. наук, зам. директора,
МИЭМ НИУ ВШЭ,

В. Я. Цветков, д-р техн. наук, проф.,
советник ректора Московского государственного
университета геодезии и картографии
e-mail: cvj2@mail.ru

Геознание: представление и лингвистические аспекты

*Рассмотрено новое понятие в геоинформатике — гео-
знание. Представлены основные виды геознания и рас-
крыто его содержание. Показаны различия между гео-
информационным и географическим знаниями, а также
связь и различия между пространственным, деклара-
тивным и процедурным знаниями. Раскрывается георефе-
ренция как основа получения и представления геознания.
Показана связь между пространственными отношениями
и геознанием. Рассмотрены лингвистические особенности
представления пространственных отношений. Приво-
дятся информационные пространственные ситуации.
Даны графические модели информационного взаимодей-
ствия пространственных объектов.*

Ключевые слова: геоинформатика, геознание, про-
странственное знание, знание, пространственные от-
ношения, геореференция, лингвистика пространствен-
ных отношений

Введение

Одной из отличительных особенностей современной науки является тенденция к углубленному изучению смысловой стороны процессов и явлений. Она проявляется в геоинформатике, где вызвана необходимостью рассматривать средства и единицы информационных взаимодействий и информационных ситуаций с учетом лингвистических факторов, имманентных свойств пространственных объектов. Это мотивирует изучение различных видов знаний, включая геознания. По мере развития геоинформатики [1] в ней возникают и решаются новые задачи и проблемы. Появляются новые термины, обусловленные развитием новых областей исследования и обобщением существующих понятий. К числу таких новых понятий относится геознание как новый вид знания, обусловленный интеграцией, в первую очередь, пространственного знания, используемого в искусственном интеллекте, и знаний, применяемых в геоинформатике. При введении нового понятия необходимо выявить сходство и различие с близкими понятиями. Структурно геознание отли-

чается от знания, применяемого в управлении и теории искусственного интеллекта. Это обусловлено следующими основными причинами:

- *лингвистический аспект* — привязка к конкретной предметной области сужает объем понятия;
- *интеграционный аспект* — появление дополнительных отношений и связей позволяет объединять различные виды информации и знаний и получать на этой основе новые модели и новое знание.

Лингвистические аспекты

Необходимо связать термин геознание с родственными терминами и разграничить его с терминами, которые не являются родственными или связанными с ним лингвистическими отношениями, но по звучанию вызывают ассоциации связи.

Геознание является обобщением следующих понятий: географическое знание [2, 3], пространственное знание [4—6], геоинформационное знание. Поскольку геоинформатика интегрирует науки о Земле, то и геознание интегрирует знания наук о Земле, которые являются основой интеграции геоинформатики: геодезии, картографии, фотограмметрии, дистанционного космического зондирования, космической геодезии.

Геознание включает фрагментарно знания областей геоинформатики или знания, с которыми есть общие с геоинформатикой области исследований: геодинамика, транспорт [7], искусственный интеллект [8], геология [9], инженерные изыскания [10], экология, кадастр, землепользование [11] и др.

К недостаткам некоторых исследований в области геоинформатики следует отнести ряд введенных терминов, которые не являются обоснованными, а в некоторых случаях авторы терминов не могут придумать даже правильной дефиниции для этих новых терминов. Это прежде всего такие суррогаты, как "геопространственное знание", "кибернетическая цифровая модель", "высокоточная цифровая модель" [12, 13] и другие, но они не имеют отношение к геознанию.

Особо следует остановиться на термине "геопространственный". Этот термин имеет право на существование, но в рамках того объема понятия, который он содержит, а не в расширительном смысле, как его довольно часто употребляют.

Первая особенность этого термина в том, что для большинства людей, знающих физику, категории "пространство" и "время" — это разные категории, которые синонимами не являются. Тем не менее, термин "геопространственный" часто употребляют для описания временных характеристик, что является грубой ошибкой.

Вторая особенность состоит в несоответствии области применения и объема понятия. Рассмотрим часто употребляемый термин "геопространственные данные". Для тех, кто знаком с теорией множеств, очевидно, что "данные" являются множеством (или общим классом). "Пространственные данные" являются подмножеством множества "данные" и не являются временными данными. "Геопространственные данные" являются подмножеством "пространственных данных" и также не содержат временных данных. Употребление термина "геопространственные данные" как синонима термина "геоданные", который содержит три группы ("место", "время", "тема), является ошибкой.

Что такое геознание?

Представление пространственных знаний (Spatial Knowledge) исследуется более 40 лет. Необходимо отметить работу Бенжамина Купера (1978 г.) "Моделирование пространственных знаний" [4], на которую в апреле 2013 г. было 732 цитирования. Первоначально эта проблема соотносилась только с областью искусственного интеллекта. С 90-х годов прошлого века после появления геоинформатики началась интеграция геоинформационных технологий и методов искусственного интеллекта в области представления пространственных знаний [2, 8]. Кроме того, эта проблема изучается в психологии и образовании в аспекте когнитивного пространственного моделирования и когнитивной графики.

В теории искусственного интеллекта выделяют процедурные и декларативные знания. Геознания можно рассматривать как синтез декларативных, процедурных и пространственных знаний.

Прежде чем дать определение геознания, проведем небольшой анализ. Геознание (GK) как подмножество знания представляет собой объединение декларативного (D), процедурного (P) и пространственного (C) множеств:

$$GK = D \cup P \cup C,$$

где пересечение множеств D и P является пустым. В теории искусственного интеллекта такое описание из двух множеств является основой знания. В геознании появляется еще одна составляющая, называемая пространственной. Именно эта составляющая обуславливает отличие пространственного геознания от знания, применяемого в искусственном интеллекте. Она позволяет соотносить геознание с точками пространства. С точки зрения дефиниции геознание сужает объем понятия термина "знание", поэтому является подмножеством множества "знания".

Особенностью геознания является возможность его визуального отображения на картах, схемах, фотоснимках и других визуальных моделях, что позволяет подключать когнитивные области человеческого восприятия для визуального (образного) анализа и повышает эффективность анализа. Это дает возмож-

ность говорить о визуальном отображении геознания, что не всегда приемлемо для других видов знаний.

Для обозначения отображения φ множества A на множество B используется запись

$$\varphi: A \rightarrow B.$$

Если $x \in A$, то множество всех элементов из B , сопоставляемых при отображении φ элементу x , обозначается $\varphi(x)$ и называется *образом элемента x* .

В геознании широко применяют топологические и картографические модели.

Пространственная составляющая геознания связана с отображением и описанием пространственных конструкций, пространственных структур, пространственных отношений, топологий и референций и может быть выражена в визуальной форме отображений пространственных объектов и моделей.

Благодаря возможности визуального отображения геознание имеет специфические характеристики и структуру [5], например, такие характеристики, как обозримость и воспринимаемость [14].

Отличительной особенностью геознания является то, что оно снимает или уменьшает селекционные ограничения на применимость аргументов предикатов при соотношении качественных и количественных шкал.

Например, утверждение "номер два это — синее" синтаксически хорошо сформировано, но на каком-то уровне (голубое) оно может быть аномальным [15]. "Голубые" не является предикатом, который может быть преобразован в числа, соответствующие синему. Но это в обычной логике и в обычном знании.

В *пространственном знании* при использовании визуальной картографической формы может задаваться цветовая шкала оттенков. Каждый из оттенков соответствует интервалу (количественная шкала) и номеру (порядковая шкала). В этом случае предикаты: "голубое", "синее", "темно-синее" и "светло-синее" и другие попадают в числовой ряд и могут использоваться в обработке.

Географическим знаниям присущи недостатки, связанные с нечеткостью и неопределенностью географических категорий. Например, категории "Сибирь", "Дальний Восток", "далеко от Москвы", "близко от Новгорода", которые часто используются в повседневной жизни, не соответствуют строго определенным регионам и в контексте употребления могут обозначать разные пространственные объекты.

В *геоинформатике*, в большинстве ГИС, в пространственных базах данных, в инфраструктуре пространственных данных (ИПД) [16] эта информация детализируется, уточняется и позволяет как референт использовать такое название с дополнением его необходимой информацией для того, чтобы точно определить пространственную область.

Таким образом, геознание в качественном отношении может включать географические атрибуты, но дополняет их количественными значениями из геоинформатики и тем самым уменьшает неопределенность [3] и повышает точность определения.

Представление геознаний

Одна из проблем представления знаний формулируется как "Quantitative vs Qualitative", что означает "количественное против качественного" [15]. Шкалы качественных и количественных переменных в классическом описании разделены [17], и возникает проблема при переходе от качественных категорий к количественным для выполнения обработки (включая компьютерную). Вышеприведенный пример с "голубым" и "синим" показывает, что геознание через визуальные модели, имеющие качественно-количественные характеристики, устанавливает связь между шкалами и решает эту проблему.

Представление знаний (knowledge representing — KR) включает представление фактов и представление понимания этих фактов. Поэтому иногда употребляют термин "Knowledge Representation and Reasoning — (KRR)" — представление и понимание. Это ярко проявляется в геознании, в котором подключается когнитивная область человека как обязательный инструмент восприятия и анализа.

В геознании процесс понимания стандартизован применением библиотек визуальных образов (например, условных знаков), т. е. процессы понимания в геознании более регламентированы и отработаны. Особенность геознания — связь цветовых и морфологических характеристик с качественными и количественными значениями — в обычном знании отсутствует.

Современное представление пространственных знаний, в первую очередь как геознаний, имеет свои особенности [18]. Получение геознаний связано с информационным моделированием, с пространственным анализом, с геостатистикой. Проблема формирования геознаний связана с развитием информационных методов, в частности, с моделями информационной позиции, информационной ситуации [19] и др. В частности, *информационная позиция* пространственного объекта определяется на основе текущей оценки состояния объекта наблюдения по отношению к внешней среде в информационном поле. На основе информационной позиции осуществляется моделирование и прогноз динамики состояний объекта наблюдения и среды.

Получение пространственных знаний включает этапы построения терминологического поля, построение онтологий [20], извлечение знаний из фактов наблюдения (data mining) и результатов обработки пространственных данных. Пространственные знания отражают знания о пространственных объектах и знания о пространственных и непространственных отношениях [21]. Представление знаний включает использование онтологий, систематики и классификации различных объектов, представленных в концептуализации модели мира, вместе с учетом их свойств и отношений.

Возникнув как направление в философии, формальная онтология стала одним из важных направлений в информационных системах исследований,

с приложением в задачах поддержки согласованности и последовательности при объединении знаний большого объема из различных источников. Этот аспект онтологий в пространственном знании применяют при создании электронных карт большого объема и при работе с базами геоданных.

Три типа геознаний

В настоящее время выделяют три типа геознаний. Первый тип геознаний связывают с абстрактными пространственными моделями. Этот тип знаний применяют в области математики, искусственного интеллекта и частично в области геоинформатики. По существу это область пространственных знаний [4, 5, 15], применяемых в геознании.

Второй тип геознаний связывают с конкретными пространственными объектами и моделями, их расположением на земной поверхности и в реальном пространстве. Этот тип знаний применяют, в первую очередь, в области геоинформатики и в науках о Земле. Он приводит к понятиям пространственные отношения [21] и геореференция [2, 22, 23]. Геознание часто рассматривается как форма знания, связанного, в первую очередь, с пространственными отношениями на земной поверхности. Однако это не единственная его форма.

Третий тип геознаний связывают с мышлением и представлением пространственных объектов и моделей в когнитивной области человека. Этот тип знаний применяют, в первую очередь, в области психологии, образования, а во вторую очередь — в геоинформатике и искусственном интеллекте.

Знание об объектах в теории искусственного интеллекта, как правило, используют описания, основанные на традиционной лингвистической или аналитической форме. Пространственные знания могут быть достаточно адекватно переданы не только в традиционной форме, но и в дополнительных описаниях (карты, цифровые модели, изображения, псевдоизображения, трехмерные визуализации, пространственные топологические схемы).

Географическое и геоинформационное знание

В термин "геознание" входят две разновидности (геоинформационное знание; географическое знание [2]), между которыми существует различие. Термин "географические знания" появился раньше термина "геоинформационные знания". Это обусловлено тем, что география существовала на несколько столетий раньше геоинформатики. Географические знания получают из процедурных и вторичных источников, поэтому они имеют, в первую очередь, качественные признаки и, во вторую очередь, количественные [2]. Это создает структурную несогласованность между качественными и количественными характеристиками географического знания [2].

Географические знания определяются качественными категориями "близко — далеко", "расположение относительно Севера", "город в данной стране".

Альтернативные им геоинформационные знания определяются количественными категориями: "расстояние до данного объекта", "азимут", "координаты данного объекта". Очевидно, что во втором случае мы имеем дело с количественными характеристиками, которые можно измерять и обрабатывать.

Преподаватели в области наук о Земле и аналитики, работающие в этой области, понимают, что при изучении пространственных знаний второго типа происходит переход от знаний о местности (отчасти субъективных), к знаниям, полученным через символы и отображение карт [24]. Это подчеркивает важную окраску географического знания как знания, содержащего субъективные характеристики, субъективную интерпретацию и значительную неопределенность. Степень этой неопределенности может быть разной в зависимости от применяемых методов и точности инструментов.

Геознания как геоинформационные знания, которые получают на основе сбора количественной информации, ее обработки и анализа, являются структурно согласованными в количественном и качественном отношениях. Отсюда географические методы часто используют качественные оценки, в то время как геоинформационные методы опираются и на количественные оценки и связанные с ними качественные понятия.

Пространственные геоинформационные модели, например, карты, космические снимки, радиолокационные снимки, цифровые модели, обеспечивают пространственный контекст, по которому исследователь может осуществить структурную согласованность пространственных объектов и адекватно их интерпретировать.

Еще одно различие между географическими и геоинформационными категориями выявили Смит и Марк [3]: "географическое" и "визуальное" на карте являются различными понятиями для многих людей и особенно для студентов. Категория "географическое понятие" имела самую низкую степень согласованности с тем, что эта категория означает на практике. Авторы пришли к выводу, что термин "визуальный" является в реальной практике более широко употребляемым, чем термин "географический". Термин "визуальный" (визуальное моделирование) является термином геоинформатики, т. е. еще раз подчеркнута точность геоинформационного знания.

Географические категории часто являются обобщениями. Например, достаточно часто термин "географические координаты" используют как обобщение астрономических и геодезических координат [25]. В других случаях термином "географические" заменяют термин "геодезические". Например, в ГИС географической сеткой называют сетку широт и долгот, полученную с помощью геодезических измерений и в геодезических проекциях. Строго говоря, эта сетка является геодезической.

Значительная неопределенность географических категорий является результатом существования диапазона интерпретации референций места и диапа-

зона пограничных значений пространственно-координатного отпечатка таких референций [26]. В то же время "четкость" категорий обычно используется в ГИС для определения пространственных особенностей, где нет никаких неточностей в определении границ местоположения.

Референция и геореференция

Важной онтологической характеристикой знания и пространственного знания является референция. Для геознания это понятие трансформировано в понятие геореференции [2, 22, 23] как средства описания получения геознания о земных объектах.

Для описания пространственных объектов широко применяют графовые (топологические) модели. В этих моделях могут быть использованы и другие виды отношений. При этом следует отличать пространственный граф, который содержит пространственную топологию, от описательного графа, который содержит дополнительное описание. В этих моделях используют следующие отношения:

- функциональные (определяемые обычно глаголами "производит", "влияет", ...);
- количественные (больше, меньше, равно, ...);
- пространственные (далеко от, близко от, за, под, над, ...);
- временные (раньше, позже, в течение, ...);
- атрибутивные (иметь свойство, иметь значение);
- логические (И, ИЛИ, НЕ);
- лингвистические.

Геореференция может рассматриваться как процесс и как отношение. В этом она сходна с классификацией. Как процесс, геореференция означает определение объекта (геореференции) в физическом пространстве. Существует понятие объективной точки геореференции. Например, такой точкой является центроид ареального объекта. Существует понятие "когнитивной точки референции" [5]. В этом случае референция связана с когнитивной областью восприятия человека.

Геореференция, как отношение, может задаваться по-разному. Геореференция, определяемая наименованием, несущим характеристики отношений или описание объекта, называется идентифицирующей. Идентифицирующая геореференция связана с идентификатором объекта исследований и использует три вида отношений — *указание, именование* и *обозначение*.

Выбор отношения при идентификации пространственного объекта обусловлен следующими правилами. Отношение "обозначение" применяют в ситуации явного описания объекта исследования. В математике оно соответствует явному описанию функции. Отношение "именование" применяют в ситуации неявного описания объекта космических исследований. В математике оно соответствует неявному описанию функции.

Отношение "именование" применяют при отсутствии описания объекта, но при наличии других объектов, связанных с объектом исследования. Эти

объекты находятся в пространственных отношениях с объектом исследования. В математике такое отношение соответствует набору ограничений, определяющих область существования.

Пространственные отношения в геознании

Пространственные отношения являются одним из источников формирования геознаний. В геоинформатике пространственные отношения в основном представлены в трех видах: в виде топологических отношений, в виде геореференций, в виде пространственных иерархических отношений вида ISA, АКО.

Отношение классификации ISA происходит от английского "is a". Говорят, что множество (класс) классифицирует свои экземпляры (например, "улица есть часть городской территории"). Иногда это отношение именуют "member of". По-русски это может называться "есть" (единственное число) или "суть" (множественное число). Связь ISA предполагает, что *свойства объекта наследуются от множества*.

Обратное отношение — "example of" или "пример". Поэтому процесс порождения элементов из множества называется экземпляцией.

Отношение между множеством и подмножеством АКО происходит от английского "a kind of", например, "городские районы есть подмножество городской территории".

Отличие АКО от отношения ISA заключается в том, что ISA — отношение "один ко многим", а АКО отношение — "многое к многим".

Применяя иерархические типы отношений, следует четко различать, какие объекты являются классами, а какие — экземплярами классов. При этом вовсе не обязательно, что одно и то же понятие будет классом или экземпляром во всех предметных областях.

Так, "студент" всегда будет классом в базах знаний типа "студенческая группа" или "вуз", но может быть экземпляром класса учащихся.

Наличие отношения классификации еще не говорит о существовании системы классификации, а только служит основой для нее. Исключение составляют те случаи, когда классификация уже создана.

Объект, как сложная система, состоит из нескольких частей или элементов. Например, город включает улицы, площади, дома, объекты инфраструктуры, инженерные сооружения и т. д. Это определяет еще один тип отношения — отношение целого и части.

Отношение меронимии — отношение целого к части ("has part"). Мероним — объект, включающий другой объект как часть: "Город включает городские районы. Городская территория включает улицы".

Отношение холонимии — отношение части к целому ("is a part"): "Улица часть городской территории".

Улица — холоним для городской территории. Городская территория — мероним для улицы.

Основные идеи лингвистики геознаний сформированы на основе идей и положений, отраженных в статье Энтони Гэлтона [15]. Данная статья является итоговой, поскольку она не только обобщает работы более чем 100 исследователей в этой области, но и вводит в рассмотрение дополнительно к "пространственному знанию" еще и "пространственно-временное знание".

Говоря о достоинствах статьи Энтони Гэлтона [15], посвященной эволюции и особенностями пространственного и пространственно-временного знания, необходимо отметить ее недостатки.

Семантическая сущность информационных единиц [27] пространственного знания (геознания) связана с наличием признаков: дейктивности, релятивности, референциальности и ситуативности. Эти термины широко применяются в лингвистике.

Поясним для неискушенного читателя, что дейктивность означает свойство "указывать на что-то". Релятивность — это относительность, важное свойство, которое позволяет обобщать и переносить знания из одной области в другую. Референциальность надо отличать от референции [2, 22]. Для этого понятия воспользуемся определением К. Доннелана [28]. Он определяет референциальность как характеристику определенных способов употреблять языковые конструкции. Примером такого способа является синтаксис. Ситуативность — это учет или учет и описание ситуации, в которой находится объект или явление.

Рассматривая пространственные отношения, Энтони Гэлтон [15] не определяет свойство ситуативности, т. е. не вводит понятие информационной ситуации [29]. В силу этого у него описание пространственных отношений в некоторых случаях не отделяется от информационной ситуации и даже подменяет ее. Ситуация и отношение — существенно разные категории. На уровне интуиции он включает референциальность и дейктивность. Но на уровне описания их не применяет.

Энтони Гэлтон также не вводит функциональные пространственные характеристики. Это обусловлено тем, что, как он пишет в заключении, в первую очередь он опирался на подход и методы искусственного интеллекта и старался не использовать методы геоинформатики.

Одно из основных различий подходов в области искусственного интеллекта (ИИ) и геоинформатики (ГИ) состоит в неиспользовании в ИИ и использовании в ГИ локализации, или позиционирования, пространственных объектов.

Оба направления используют аппарат теории множеств, для которого важны отношения между множествами и элементами. Но в искусственном интеллекте не учитываются координатные характеристики, т. е. позиция множества в реальном пространстве.

В геоинформатике позиционирование (координатное определение) является дополнительным

Функциональные пространственные характеристики [15]

Характеристика	Значение (Meaning)
$D(R_1, R_2)$	Расстояние между R_1 и R_2
$S(R_1)$	Площадь R_1
$L(R_1)$	Протяженность, длина R_1
$Co(R_1, n1B, n2H)$	Координаты R_1 широта ($n1$), долгота ($n2$)
$Co(R_1, n1B, n2H, n3A)$	Координаты R_1 широта ($n1$), долгота ($n2$), альтитуда ($n3$)
$Co(R_1, n1X, n2Y)$	Координаты R_1 : $X = n1$; $Y = n2$
$Co(R_1, n1X, n2Y, n3Z)$	Координаты R_1 : $X = n1$; $Y = n2$; $Z = n3$
$Co(R_1, n1\phi, n3R)$	Координаты R_1 : $\phi = n1$; $R = n3$
$Co(R_1, n1\phi, n2\theta, n3R)$	Координаты R_1 : $\phi = n1$; $\theta = n2$; $R = n2$

Таблица 2

Основные пространственные отношения

Отношения (Relation)	Обозначение (Symbol)	Значение (Meaning)
Отношение отсутствия связи	$R_1, \text{ANC } R_2$	R_1 and R_2 are not connected. R_1 и R_2 не связаны
Отношение связи	$R_1, \text{AC } R_2$	R_1 and R_2 are connected. R_1 и R_2 связаны
Иерархическое отношение классификации "есть часть", "один ко многим". Множество (класс) классифицирует свои экземпляры	$R_1, \text{ISA } R_2$	R_1 is part of R_2 , свойства объекта (экземпляра) R_1 наследуются от множества (класса) R_2
Иерархическое отношение агрегации "есть экземпляр" "один ко многим"	$R_1, \text{EXO } R_2$	R_1 example of R_2 . Объект R_1 есть экземпляр объекта R_2 , R_1 есть элемент системы R_2
Иерархическое отношение классификации "есть часть", "многое к многим" Подмножество есть часть множества	$R_1, \text{AKO } R_2$	R_1 a kind of R_2 . Подмножество R_1 есть часть множества R_2 , свойства подмножества R_1 наследуются от множества R_2
Иерархическое отношение агрегации, "отношение меронимии" — отношение целого к части	$R_1, \text{HPA } R_2$	R_1 has part R_2 , R_1 имеет в качестве части R_2
Иерархическое отношение агрегации, "отношение холонимии" — отношение части к целому	$R_1, \text{IPA } R_2$	R_1 is a part R_2 , R_1 является частью R_2

фактором, который различает множества, не различимые с позиций искусственного интеллекта. Этот фактор обусловлен введением в рассмотрение точек отсчета [30] и координатных систем. Точка отсчета определяет точное положение системы координат и положение объектов в этой системе. В области ИИ эта идея трансформировалась во ведение когнитивной точки отсчета (ссылки) *Cognitive Reference Points (CRP)*. Но *CRP*, по существу, — субъективная качественная характеристика, связанная с исследователем. Точка отсчета в геоинформатике и геодезии [25] — объективная качественная и количественная характеристика.

Можно констатировать, что исследование пространственных объектов в ИИ опирается на морфологический подход, а исследование пространственных объектов в геоинформатике — на координатно-морфологический подход. Оба подхода не противоречат друг другу, но в ИИ доминирующими являются морфологические характеристики и отношения, а в геоинформатике — позиционные характеристики, в первую очередь, и морфологические — во вторую.

Возможно по этой причине Энтони Гэлтон [15] не вводит функциональные пространственные характеристики, которые являются важными при изучении пространственных объектов. Эти основные характеристики приведены в табл. 1. Для того чтобы легче было сравнивать содержание статьи [15] и данной статьи, в табл. 2 и 3 в некоторых случаях сохраняются английские термины и пояснения, используемые в единственной таблице статьи [15].

Для характеристик табл. 1 применяется следующий синтаксис:

$$F(a_1, a_2, a_n) = (A_1, A_2, A_n),$$

где F — идентификатор функциональной характеристики; a_1, a_2, a_n — перечень параметров; A_1, A_2, A_n — перечень значений параметров.

Табл. 1 может дополняться, так как в ней приведены только основные характеристики и показаны особенности их применения.

В табл. 2 приведены основные пространственные отношения. Она построена по аналогии с таблицей отношений [15], но имеет существенные дополнения и различия. В работе [15] обозначения приводятся без предикатов, там даются другие названия отношений для *ISA* и *АКО*, в то время как эти обозначения достаточно употребляемые. В [15] не разделяются отношения агрегации, классификации и индикации. В табл. 2 выделены отношения агрегации и классификации. Отношение *ISA* предполагает, что *свойства объекта наследуются от множества*. Отличие *АКО* от отношения *ISA* заключается в том, что *ISA* — отношение "один ко многим", а *АКО* отношение — "многое к многим".

Для характеристик табл. 2 применяется следующий синтаксис:

$$R_1, \text{SRel } R_2,$$

где *SRel* — идентификатор пространственного отношения; R_1 — первый объект отношения (первый коррелят); R_2 — второй объект отношения (второй коррелят). Следует отметить, что элементы отношения могут быть коррелятами [31], но это не обязательное условие.

В табл. 3 приводятся информационные пространственные ситуации. Информационная ситуация — это разновидность информационной модели, но не самого объекта, а микроокружения, в котором он находится.

Таблица 3

Информационные пространственные ситуации

Информационная ситуация	Обозначение Symbol	Значение
Ситуации перекрытия		
Наличие перекрытия	OV	R_1 overlaps R_2
Отсутствие перекрытия	DC	R_1 is discrete from R_2 R_1 does not overlap R_2
Полное перекрытие	FO	R_1 full overlaps R_2
Частичное перекрытие	PO	R_1 partially overlaps R_2
Ситуации эквивалентности		
Эквивалентность	EQ	R_1 is equal to R_2
Неэквивалентность	NEQ	R_1 is not equal to R_2
Ситуации соединения		
Отсутствие соединения	DC	R_1 is discrete from R_2 R_1 is disconnected from R_2
Соединение без перекрытия (отношение "общая граница")	EC	R_1 is externally connected to R_2 R_1 and R_2 are connected but do not overlap
Частичное соединение без перекрытия ("частичная граница")	PC	R_1 is partially connected to R_2 R_1 and R_2 are partially connected and overlap
Ситуация части и целого		
R_1 является собственной частью R_2	PP	R_1 is a proper part of R_2 R_1 is part of R_2 but not equal to it
R_1 представляет собой тангенциальную правильную часть R_2	TPP	R_1 is a proper part of R_2 and some region is EC to both R_1 is a tangential proper part of R_2
R_1 не является тангенциальной частью R_2	NTPP	R_1 is a non-tangential proper part of R_2 R_1 is a proper part of R_2 but not a TPP

Для характеристики табл. 3 применяется следующий синтаксис.

$$F(a_1, a_2, \dots, a_n; b_1, b_2, \dots, b_n) A_1, A_2, A_n,$$

где F — идентификатор пространственной информационной ситуации; $a_1, a_2, \dots, a_n; b_1, b_2, \dots, b_n$ — параметры описания ситуации; A_1, A_2, A_n — значение (значения) ситуации.

Для пояснения приведем графическую интерпретацию некоторых информационных ситуаций. На рис. 1 приведены информационные ситуации DC , EC , PO . Соединительная линия связывает эти ситуации, и в совокупности они отражают процесс информационного взаимодействия между объектами (a, b).

В работе [15] также не рассматривается информационное взаимодействие [32] пространственных объектов. Информационные ситуации на рис. 1 отражают состояния: отсутствия взаимодействия

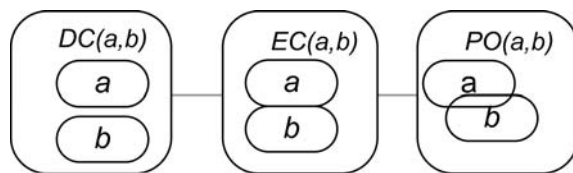


Рис. 1. Информационные ситуации, отражающие информационное взаимодействие

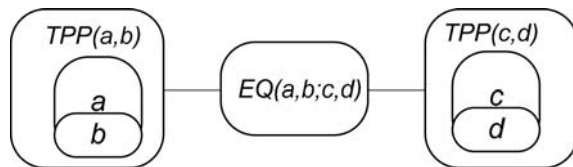


Рис. 2. Ситуация эквивалентности для тангенциально правильных частей

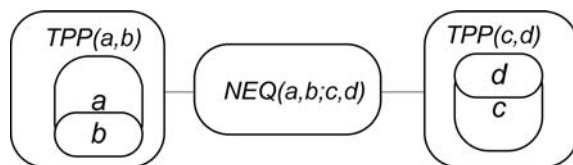


Рис. 3. Ситуация неэквивалентности для тангенциально правильных частей

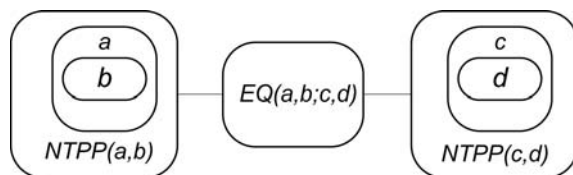


Рис. 4. Ситуация эквивалентности для нетангенциальных частей и объектов

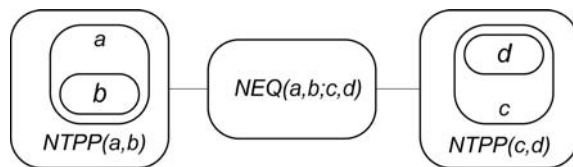


Рис. 5. Ситуация неэквивалентности для нетангенциальных частей и объектов

(ситуация DC), начало взаимодействия (ситуация EC), процесс взаимодействия (ситуация PO).

На рис. 2 приведена ситуация эквивалентности для тангенциально правильных частей b, a по отношению к d, c (TPP, EQ — информационные ситуации).

На рис. 3 приведена ситуация неэквивалентности для тангенциально правильных частей b, d по отношению к a, c (NEQ — информационная ситуация).

Следует отметить, что в работе [15] такую ситуацию считают эквивалентной. Это допустимо с позиций морфологии, но включение координат в рассмотрение делает ситуацию на рис. 3 неэквивалентной, поскольку координаты частей b и d существенно различны.

На рис. 4 приведена ситуация эквивалентности для нетангенциальных частей ($EQ, NTPP$ — информационные ситуации).

На рис. 5 приведена ситуация неэквивалентности для нетангенциальных частей

В работе [15] ситуацию на рис. 5 считают эквивалентной. Это допустимо с позиций морфологии, но включение координат в рассмотрение делает ситуацию на рис. 5 неэквивалентной, поскольку координаты частей *b* и *d* различны.

Заключение

Применение и анализ пространственных отношений существенно упрощается при использовании лингвистического обеспечения как формального описания. Один из вариантов, апробированный в [15] и развитый в настоящей работе, приведен в табл. 1–3 и на пиктограммах на рис. 1–5. Пространственные отношения имеют свой язык, синтаксис и условные графические обозначения. Использование методологии искусственного интеллекта или только морфологического анализа упрощает ситуации и делает неэквивалентные с позиций геодезии и геоинформатики ситуации — эквивалентными. Поэтому применение геоинформатики дает более точные оценки пространственной ситуации и пространственным отношениям.

Особенностью геознания является наличие пространственной составляющей. Геознание позволяет соотносить качественные переменные, представленные в визуальной форме с порядковой шкалой количественных переменных, что дает возможность решать новые задачи.

Геознания отражают не одну предметную область, а интегрированные с геоинформатикой предметные области [7]. Это повышает их ценность по сравнению со знаниями отдельных предметных областей. Корни геознания лежат в области пространственных знаний и опираются на исследования именно в этой области.

Пространственное знание в качестве основы использует геореференцию и пространственные отношения, которые являются основой пространственного знания. Пространственное знание позволяет решать новые задачи в области геоинформатики, искусственного интеллекта и в области наук о Земле [17]. Пространственное знание применяется при создании и организации инфраструктур пространственных данных.

Список литературы

1. **Майоров А. А.** Современное состояние геоинформатики // Инженерные изыскания. 2012. № 7. С. 12–15.
2. **Hill L.** Georeferencing: The Geographic Associations of Information. Cambridge, Massachusetts: MIT, 2009. 272 p.
3. **Smith B., and Mark D. M.** Geographical categories: An ontological investigation // International Journal of Geographical Information Science. 2001. N 15 (7). P. 591–612.
4. **Kuipers B.** Modeling Spatial Knowledge // Cognitive Science. 1978. N 2. P. 129–153.
5. **Tverksy V.** Levels and Structure of Spatial Knowledge. URL: <http://www-psych.stanford.edu/~bt/space/papers/levelsstructure.pdf>.
6. **Малинников В. А., Майоров А. А., Савиных В. П., Цветков В. Я.** Знания и пространственные знания // Тр. 7-й Международ. науч.-практ. конф. "Геопространственные технологии и

сфера их применения". Материалы конференции. М.: Информационное агентство "Гром", 2011. С. 12–14.

7. **Майоров А. А., Цветков В. Я., Маркелов В. М.** Геоинформационный подход в логистике // Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 6. С. 93–97.

8. **Савиных В. П., Цветков В. Я.** Развитие методов искусственного интеллекта в геоинформатике // Транспорт Российской Федерации. 2010. № 5. С. 41–43.

9. **Скнарина Н. А.** Решение задач расстановки сети датчиков при организации геоинформационной системы мониторинга оползнеопасных склонов. Ганновер: Cybernetika-verlag // Кибернетика. 2011. № 6. С. 25–29.

10. **Майоров А. А., Цветков В. Я.** Применение информатики и геоинформатики в инженерных изысканиях // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. Матер. 8-й общероссийской конф. изыскательских организаций, 13–14 декабря 2012. М.: ООО "Геомаркетинг". 2012. С. 140–142.

11. **Бахарева Н. А.** Применение информационных технологий в кадастре и мониторинге земель // Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 2. С. 87–89.

12. **Савиных В. П.** О терминологии в области геодезии // Международный научно-техн. и производ. журнал "Науки о Земле". 2012. № 4. С. 34–36.

13. **Кулагин В. П.** О неадекватном применении некоторых терминов // Матер. междунар. образоват. форума "Бургас 2013". Бургас: ЕООД ИХНИИТ, 2013. С. 82–86.

14. **Розенберг И. Н., Цветков В. Я.** Среда поддержки интеллектуальных систем // Транспорт Российской Федерации. 2011. № 6. С. 6–8.

15. **Galton A.** Spatial and temporal knowledge representation // Earth Science Informatics, September, 2009. Vol. 2, N 3. P. 169–187.

16. **Савиных В. П., Соловьёв И. В., Цветков В. Я.** Развитие национальной инфраструктуры пространственных данных на основе развития картографо-геодезического фонда Российской Федерации // Геодезия и аэрофотосъемка. 2011. № 5. С. 85–91.

17. **Тихонов А. Н., Цветков В. Я.** Методы и системы поддержки принятия решений. М.: МаксПресс, 2001. 312 с.

18. **Цветков В. Я.** Пространственные знания: Формирование и представление LAP LAMBERT. Saarbrücken: Academic Publishing GmbH & Co. KG. 2013. 107 с.

19. **Tsvetkov V. Ya.** Information Situation and Information Position as a Management Tool // European Researcher. 2012. Vol. (36), N 12-1. P. 2166–2170.

20. **Иванников А. Д., Кулагин В. П., Мордвинов В. А.** и др. Получение знаний для формирования информационных образовательных ресурсов. М.: ФГУ ГНИИ ИТТ "Информика", 2008. 440 с.

21. **Цветков В. Я.** Пространственные отношения в геоинформатике // Междунар. научно-техн. и производ. журнал "Науки о Земле". 2012. № 01. С. 59–61.

22. **Майоров А. А., Цветков В. Я.** Геореференция как применение пространственных отношений в геоинформатике // Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 3. С. 87–89.

23. **Цветков В. Я.** Геореференция как инструмент анализа и получения знаний // Междунар. научно-техн. и производ. журнал "Науки о Земле". 2011. № 2. С. 63–65.

24. **Ishikawa, T., and Kastens K. A.** Why some students have trouble with maps and other spatial representations // Journal of Geoscience Education. 2005. N 53 (2). P. 184–197.

25. **Геодезия**, картография, геоинформатика, кадастр: Энциклопедия. В 2-х т. / Под ред. А. В. Бородко, В. П. Савиных. М.: Геодезкартиздат, 2008. Т. I. 496 с.

26. **Burrough P., Frank A. U.** Geographic objects with indeterminate boundaries // GISData. 1996. N 2.

27. **Tsvetkov V. Ya.** Information objects and information Units // European Journal of Natural History. 2009. N 2. P. 99.

28. **Donnellan K.** Reference and Definite Descriptions // The Philosophy of Language (3 edition), A. P. Martinich (ed.), Oxford University Press, 1996.

29. **Tsvetkov V. Ya.** Information Situation and Information Position as a Management Tool // European Researcher. 2012. Vol. (36), N 12-1. P. 2166–2170.

30. **Савиных В. П.** Система получения координатно-временной информации для решения задач мониторинга // Междунар. научно-техн. и производ. журнал "Науки о Земле". 2012. № 03. С. 5–10.

31. **Tsvetkov V. Ya.** Framework of Correlative Analysis // European Researcher. 2012. Vol. (23), N 6-1. P. 839–844.

32. **Tsvetkov V. Ya.** Information Interaction as a Mechanism of Semantic Gap Elimination // European Researcher. 2013. Vol. (45), N 4-1. P. 782–786.

УДК 004.514

А. С. Лакаев, д-р техн. наук, директор,
ФГУП Межотраслевой научно-исследовательский
институт "Интеграл", г. Москва,
e-mail: lakaev@indep.ru

Контекстные технологии — новое направление развития информационных технологий анализа текстовой информации

Рассматривается задача анализа неструктурированных текстовых материалов по многоаспектной проблеме научно-технического, социально-экономического или общественно-политического характера. Предлагается новая интеллектуальная контекстно зависимая технология, основанная на выделении из исходных материалов сематических структур, которые могут быстро восприниматься и интерпретироваться пользователем. Предлагаемая технология может быть полезна как для крупных корпоративных структур, так и для индивидуальных пользователей.

Ключевые слова: неструктурированная информация, контекст, анализ, смысловой образ, интерпретация, индивидуальные возможности пользователя

В статье предлагается новая технология интеллектуальной обработки неструктурированной текстовой информации, основанная на использовании уникальных возможностей человека распознавать и интерпретировать образную и структурную информацию.

Технология ориентирована на поддержку решения широкого класса задач, связанных с выявлением полезной информации из большого объема неструктурированной текстовой информации, полученной из различных источников по интересующей пользователя многоаспектной проблеме.

Под полезной информацией понимается информация о связях между значимыми элементами анализируемой проблемы. Суть предлагаемой технологии заключается в том, что пользователь воспринимает информацию о выявленных связях порциями в виде построенных специальным образом смысловых структурных образов, содержащих информацию о совокупности связей, соответствующих некоторому макроконтексту рассмотрения проблемы. Пользователь, используя свои индивидуальные

ассоциативные возможности, воспринимает выдаваемый ему образ в целом практически мгновенно, выделяя нужные ему связи, и осуществляет их анализ. В результате сокращается время получения полезной информации об интересующих пользователя связях и, как следствие, уменьшается время выявления полезной информации по анализируемой проблеме.

Проблема анализа текстов

Объем текстовой информации, которую необходимо обрабатывать и анализировать, постоянно возрастает. Современные технологии, ориентированные на анализ текстов, не позволяют эффективно решать важную для большого числа пользователей задачу — выявлять из конкретного объема разнородной текстовой информации за минимальное время максимум полезной информации в соответствии с информационной потребностью пользователя.

Основной причиной сложившейся ситуации является противоречие между неформализованной природой указанной задачи и формализованными подходами к ее решению. В настоящее время используются два основных подхода к решению задачи: один основан на поисковых механизмах, второй — на использовании различных моделей информационной потребности пользователя. Первый поисковый механизм исходит из предположения, что пользователь способен адекватно выразить свою информационную потребность в форме запроса, который включает некоторое число ключевых слов. Во втором механизме информационная потребность пользователя выражается в виде семантической сети: иерархической, как в случае с рубрикаторм, или произвольной с конкретным набором типов связей между узлами сети. В большинстве подходов [11—14] предлагаются различные меры близости либо между терминами текста, либо между терминами и элементами информационной потребности, которые отражают семантическое расстояние между соответствующими смысловыми единицами. В основе мер близости, как правило, лежат статистические показатели встречаемости терминов в тексте без учета контекста употребления этого термина. При этом наблюдается эффект "черного ящика", когда пользователь получает результат, не понимая механизма его получения. Во всех случаях информационной потребностью (ключевое слово, рубрика, узел семантической сети) является объектно-ориентированная сущность.

На практике потребность пользователя в анализе текстов в большинстве случаев имеет информационно-аналитический характер, и, соответственно, степень полезности информации имеет гораздо более сложную природу, зависящую не только от совокупности объектных сущностей, но и от более сложных семантических целостностей, общий смысл которых существенно зависит от контекста рассмотрения анализируемой проблемы в целом. Зависимость полезности анализируемого текстового материала от контекста рассмотрения и в общем случае от условий, в которых происходит восприятие конкретной информации, является основной идеей предлагаемого технологического подхода к анализу текстового материала.

Постановка задачи

На входе имеются:

- анализируемая многоаспектная проблема (Пр.), связанная с определенной предметной областью и задаваемая лингвистически законченной формулировкой, определяет информационно-аналитическую потребность пользователя;
- набор текстовых материалов (М), отобранных из различных источников по предметной области (тематике) проблемы и задаваемой набором ключевых слов;
- аналитическая задача, решаемая пользователем, связанная с выявлением и анализом связей различной природы между значимыми смысловыми единицами исходной многоаспектной проблемы;
- интервал времени (ΔT), в течение которого пользователь имеет возможность анализировать множество исходных материалов {М}.

Понятия "предметная область", "тематика проблемы" и "аналитическая задача" не являются строго формализуемыми. Для их лучшего понимания можно отметить, что содержательно они последовательно уточняют друг друга. Например, предметная область или тематика могут быть заданы словами: суперкомпьютеры, высокопроизводительные вычислители; проблема — формулировкой: повышение уровня российских разработок в области суперкомпьютеров; аналитическая задача — формулировкой: провести анализ состояния дел, тенденций и приоритетных направлений развития суперкомпьютеров. Важно, что характер и природа аналитической задачи, определяющей аналитическую потребность пользователя, связана с выявлением разнообразных связей между элементами проблемы.

Ставится задача: за отведенный интервал ΔT выявить, представить и воспринять максимум полезной информации о проблеме. Под полезной информацией в данном случае понимаются связи между элементами проблемы, которые удовлетворяют двум условиям:

- смысл выявленных связей соответствует решаемой пользователем аналитической задаче;

- восприятие выявленных связей позволяет пользователю получить новую для себя информацию об анализируемой проблеме по сравнению с обычными механизмами ознакомления с исходными материалами на основе линейного чтения или использования поисковиков.

С учетом того, что природа любой аналитической задачи является неформализованной, полезность конкретной выявленной связи является субъективной величиной, которая может быть оценена только непосредственно человеком.

Структурно-ассоциативный метод анализа неструктурированной информации

Под неструктурированной информацией по некоторой тематике понимается неоднородная по форме представления и типу документов многоаспектная информация, которая не может быть упорядочена по какому-либо классификатору или рубрике предметной области. Множество текстовых документов, отобранных по определенной предметной области или тематике, является частным случаем неструктурированной информации.

Структурно-ассоциативный метод (САМ) предназначен для решения более общей, чем исходная, задачи, связанной с механизмом выявления полезной информации из текстовых материалов в условиях, когда нет ограничений по времени анализа. Для САМ полезность текстов по тематике проблемы рассматривается как многомерная функция полезности, зависящая от связей между смысловыми единицами, которые пользователь считает необходимым учитывать при анализе проблемы (параметры функции или тематические элементы проблемы (ТЭП)). Функция полезности определена для любого сочетания тематических элементов и принимает два значения: истинное (полезно) и ложное (неполезно). В работах [1, 2], показано, что аналогично вероятностной многомерной функции, зависящей от параметров случайного графа, оценку функции полезности можно получить путем ее разложения в ряд Тейлора по ТЭП (в дальнейшем элементы проблемы) на основе определения значений функции полезности для структур, соответствующих различным сочетаниям элементов проблемы.

Связь между элементами устанавливается при условии их совместной встречаемости в одном модуле исходного текста. В качестве модуля могут выступать различные смысловые единицы, включая отдельное предложение, абзац, фрагмент заданного объема.

Поскольку процедура оценки полезности структуры, построенной на заданном наборе элементов проблемы, является неформализованной по своей природе, она реализуется пользователем на основе использования знаний о предметной области и его индивидуальных способностей воспринимать и интерпретировать структурную и образную информацию.

На эффективность применения САМ для исходной базовой постановки задачи влияет большое число различных факторов, включая: природу выбранных тематических элементов проблемы; множество сочетаний элементов проблемы, для которых строится структура связей; форму представления структуры для оценки ее полезности; индивидуальные способности пользователя воспринимать и интерпретировать структуры, построенные на элементах проблемы.

Все эти факторы определяют условия решения исходной задачи анализа неструктурированной информации. Разработка оптимальных условий решения указанной задачи является целью предлагаемой новой контекстной технологии ("context mining").

Контекстная технология анализа текстов

Основная особенность контекстной технологии заключается в том, что ее механизм ориентирован на создание благоприятных условий для максимального проявления пользователем его индивидуальных возможностей в процессе восприятия и интерпретации информации [4—6].

Предлагаемая технология основана на следующих положениях:

1. Ключевым процессом аналитической обработки информации, который во многом определяет конечную эффективность обработки, является процесс интерпретации информации, заключающийся в установлении соответствия между информацией, которую воспринимает пользователь в конкретный момент, и моделью его информационно-аналитической потребности (ИАП).

2. Модель ИАП пользователя представляет собой изменяемую во времени семантическую сеть. В узлах сети находятся важные (значимые, существенные) для решаемой задачи смысловые единицы, между которыми имеются отношения различной природы.

3. В настоящее время отсутствуют методы и технологии, позволяющие построить модель, адекватную ИАП пользователя. Ключевой процесс аналитической обработки информации, заключающийся в интерпретации воспринимаемой информации, является исключительной прерогативой человека. Его эффективность в основном определяется индивидуальными способностями пользователя воспринимать и интерпретировать информацию различной формы и природы в конкретных условиях применения [7—10].

Принципиально, что в предлагаемом подходе природа самой потребности пользователя в обработке информации имеет не информационный, а информационно-аналитический характер. В отличие от информационной, ориентированной на поиск информации, включающей объектные сущности, аналитическая составляющая потребности предусматривает выявление и анализ связей между

семантическими целостностями в целях решения некоторой исходной аналитической задачи. При этом семантическая целостность является не обязательно объектной сущностью, в частности, это могут быть факторы, обстоятельства.

Предлагаемая технология предназначена для выявления и анализа "внутренних" связей между значимыми элементами анализируемой проблемы и "внешних" связей между элементами проблемы и элементами других проблем, которые являются внешними по отношению к исходной проблеме. При этом существенно, что контекстная технология позволяет получать результат с различной глубиной анализа в зависимости от имеющегося у пользователя временного ресурса.

Технология может быть полезна для поддержки решения основных типов аналитических задач, характерных для корпоративных заказчиков и индивидуальных пользователей. Примерами возможных задач являются: мониторинг сложных объектов и процессов, анализ состояния дел по проблеме, прогноз развития проблемных ситуаций, конкурентная разведка, повышение уровня знаний по предметной области.

При этом наиболее эффективной областью применения технологии является быстрая оценка полезности исходных материалов с точки зрения решаемой аналитической задачи.

Основные этапы реализации контекстной технологии:

1. Формулировка анализируемой многоаспектной проблемы.

2. Формирование множества аспектов и соответствующих ТЭП в виде информационного паспорта проблемы (ИПП).

3. Индексация исходных текстовых материалов, в результате которой выделяется множество наиболее информационно-емких фрагментов, включающих три и более элементов, входящих в ИПП.

4. Формирование выходных структур, построенных на элементах проблемы в виде смысловых структурных образов (ССО).

5. Восприятие и интерпретация выходных ССО в целях получения пользователем полезной информации об анализируемой проблеме, необходимой для решения стоящей аналитической задачи.

На данном этапе исследований технологический и методический уровни реализации технологии позволяют для подготовленного ИПП и объема исходного материала порядка 500 Мбайт получать полезный результат за время от нескольких десятков минут до нескольких часов.

Для всех этапов предлагаемой технологии принципиальное значение имеет механизм взаимодействия трех типов вводимых контекстов: прямого, макроконтекста и ассоциативного контекста. *Прямой контекст* связи $[i, j]$ представляет собой текстовый фрагмент, включающий оба элемента i и j и помогающий понять характер и природу связи $[i, j]$.

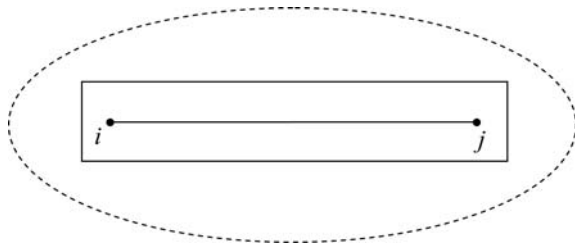


Рис. 1. Соотношение прямого и ассоциативного контекстов: прямой контекст — сплошная линия; — ассоциативный контекст — штриховая линия

Макроконтэкст вводится для проблемы в целом и определяет взгляд на проблему или ракурс ее рассмотрения. Макроконтэкст определяется общей логикой связи между заданным набором аспектов, которая помогает понять смысл конкретных связей между элементами этих аспектов. Ассоциативный контекст связи $[i, j]$ — это имеющиеся у пользователя знания о предметной области проблемы, включая условия, в которых связь, входящая во фрагмент, имеет смысл. По объему вербальной информации ассоциативный контекст, как правило, существенно превосходит прямой контекст. Качеством прямой и ассоциативный контексты конкретной связи $[i, j]$ изображены на рис. 1.

Очевидно, что объем и состав ассоциативного контекста у каждого пользователя свой.

На первом этапе формулируется анализируемая многоаспектная проблема. Каких-либо формальных ограничений на формулировку проблемы не накладывается. Как правило, по своему содержанию это формулировка некоторой тематики, которая требует более глубокого анализа в целях выработки по ней определенного мнения и (или) принятия решения.

На втором этапе формируется множество тематических элементов проблемы, которые группируются по тематическим кластерам — аспектам проблемы. Аспекты проблемы определяют тематические направления, по которым осуществляется анализ исходной проблемы. Логика связи определенного сочетания аспектов определяет макроконтэкст рассмотрения проблемы. Множество аспектов и соответствующие им элементы проблемы задают информационный паспорт проблемы. Элементами паспорта могут быть любые смысловые единицы (объекты, процессы, факторы, обстоятельства), которые целесообразно учитывать при анализе проблемы и связи которых, выявленные из исходного текста, определяют аналитическую потребность пользователя и, в конечном итоге, полезность анализируемого текстового материала.

На третьем этапе из исходного текста выделяются наиболее информационно-емкие фрагменты, включающие три и более элементов паспорта проблемы. В качестве выделенного фрагмента могут выступать различные смысловые единицы: отдель-

ное предложение, абзац, фрагмент определенного объема.

На четвертом этапе формируются выходные ССО, включающие связи между тремя и более значимыми элементами проблемы, которые входят в различные аспекты. При этом конкретная вершина (элемент) считается общей для двух и более связей, если этот элемент является общим для соответствующих фрагментов. Естественно, что прямые контексты, в которых употребляется общий для нескольких связей элемент, могут не совпадать, так как они соответствуют различным фрагментам. Фактически ССО показывают пользователю возможные новые транзитные связи между элементами аспектов, своего рода кандидатов на значимые контекстные связи.

На пятом этапе пользователь в процессе восприятия ССО, соотносит воспринимаемые связи со своей потребностью и в случае подтверждения интереса пополняет свою базу знаний о предметной области, ассоциативный контекст новыми более сложными транзитивными связями. Механизм получения новых знаний качественно показан на рис. 2.

Для обеспечения максимальной полезности выходные ССО формируются таким образом, чтобы предоставить пользователю информацию о максимальном числе связей и при этом обеспечить минимальное время их восприятия и интерпретации.

Исследования показали, что этим условиям удовлетворяют частично упорядоченные транзитивные структуры, включающие от трех до пяти кластеров, в каждый из которых входят элементы одного из аспектов проблемы. Примеры структуры выходных смысловых образов приведены на рис. 3 и 4.

Механизм восприятия информации в технологии "context mining" отличается от существующих

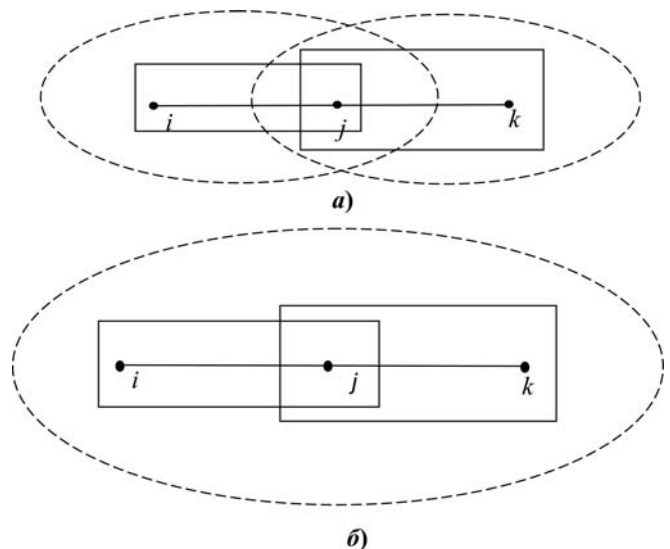


Рис. 2. Соотношение прямого и ассоциативного контекстов новой транзитивной связи $[i, j, k]$ до восприятия пользователем (а) и после (б)

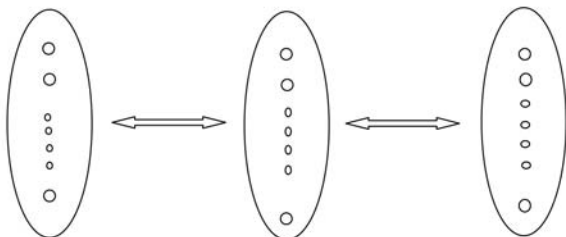


Рис. 3. Структура ССО для двух аспектов и одного транзитивного слоя

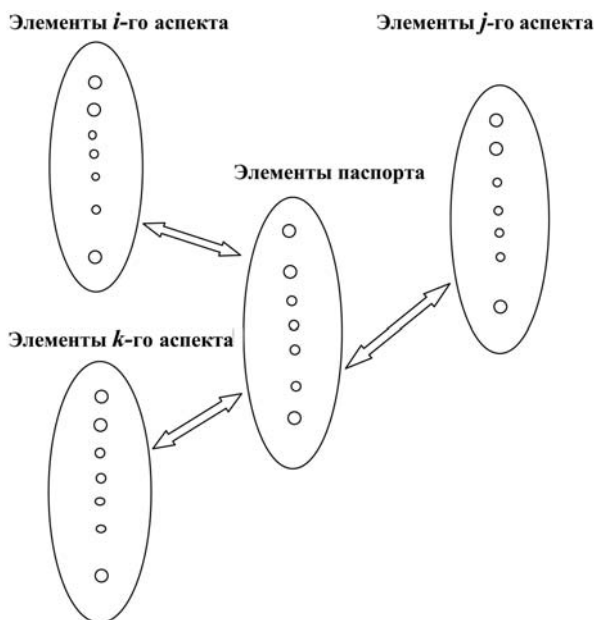


Рис. 4. Структура ССО для трех аспектов и одного транзитивного слоя

объектно-ориентированных технологий. Воспринимая ССО, пользователь прежде всего осознает макроконтекст рассмотрения проблемы, который задается совокупностью аспектов, входящих в ССО. При этом пользователь оценивает, насколько данный макроконтекст может быть интересен для решаемой аналитической задачи. Последующая интерпретация конкретных связей, оценка их новизны осуществляется пользователем уже в этом макроконтексте. Таким образом, отбор полезных связей осуществляется не отдельно по каждой связи, а порциями, соответствующими макроконтексту, представленному в виде ССО. Вследствие того, что макроконтекст включает большое число прямых контекстов, суммарное время фильтрации полезных связей в "context mining" существенно меньше.

Предлагаемая технология защищена патентом на способ автоматизированной обработки неструктурированной информации для персонализированного использования. Способ запатентован в России, США, Франции и Германии [3].

Программная реализация контекстной технологии

В настоящее время технология "context mining" реализована в институте в виде программного продукта РАИ (β -версия). РАИТ позволяет выявлять фрагменты заданного объема, включающие три и более элементов информационного паспорта проблемы. В качестве фрагмента выступает либо отдельный абзац документа, либо любой фрагмент текста заданного объема.

Две связи имеют одну общую вершину (элемент), если этот элемент является общим для соответствующих фрагментов. РАИТ позволяет работать с неограниченным объемом исходных документов. Наиболее эффективный режим использования при анализе многоаспектных проблем определяется числом выявленных фрагментов в диапазоне от 500 до 7000.

Примеры применения технологии

На данном этапе исследований различают два механизма получения новой информации. Первый основан на том, что ССО позволяет увязать в единую логическую цепочку информацию, содержащуюся во фрагментах, входящих в различные документы или отстоящих далеко друг от друга в одном документе. Вследствие естественных ограничений на оперативную память пользователю осуществить такую операцию за ограниченное время практически невозможно.

Рекомендуемая последовательность действий пользователя для данного механизма следующая. Первоначально пользователь выбирает макроконтекст рассмотрения проблемы, в котором будет выявляться полезная информация в виде логических цепочек. Выбранному макроконтексту соответствует определенный тип ССО, который выводится на экран, включая все выявленные потенциальные связи между элементами аспектов проблемы, образующими выбранный макроконтекст. Воспринимая ССО и используя ассоциативный контекст, пользователь выбирает подмножество таких выведенных элементов, между которыми на ССО имеется связь и логика этих связей представляет для него интерес. Система выводит ему ССО только с выбранными элементами (рис. 5). На практике, учитывая, что состав и природа элементов информационного паспорта пользователю известны и человек способен мгновенно распознавать структуру, все указанные шаги реализуются достаточно быстро за 10...20 с. Далее пользователь знакомится с фрагментами, которые соответствуют связям на ССО. На этом этапе в результате взаимодействия ассоциативных контекстов пересекающихся фрагментов пользователь делает выводы об интересующих его связях.

На рис. 5 приведен пример получения пользователем потенциально полезной информации о состоянии дел по проблеме в виде комментария к

ССО на основе указанного механизма по проблеме "Электронное правительство в условиях вхождения России в ВТО и таможенный союз"*.

Второй механизм получения новой информации ориентирован на выявление предпочтений из множества однородных альтернатив. В качестве альтернатив могут выступать элементы любого аспекта, в частности возможные варианты развития, приоритетные направления развития, приоритетные направления применения, условия развития анализируемой проблемы. Пользователь на основе анализа совокупности связей, близких по смыслу, используя ассоциативное мышление, выбирает предпочтительный вариант из множества альтернативных.

Последовательность действий пользователя для данного механизма на первых шагах схожа с предыдущей. Пользователь выбирает предпочтительный вариант из множества альтернативных. Пользователь выбирает множество связей с однородной природой, которые соответствуют его аналитической потребности, связанной с выявлением предпочтений из совокупности возможных вариантов. ССО с wybranymi связями выводится на экран. Пользователь знакомится с соответствующими фрагментами и, используя ассоциативный контекст, делает вывод о предпочтительности конкретных вариантов. Необходимо отметить, что в ряде случаев для получения вывода пользователю не обязательно знакомиться с текстом фрагментов, достаточно получить информацию о параметрах ССО, например, о числе фрагментов на каждой связи, о числе и характере элементов паспорта, входящих во фрагменты. В этом случае время получения результата резко снижается.

На рис. 6 приведен пример ССО, построенный для проблемы "Использование суперкомпьютеров для поддержки перспективных систем информационных технологий"

* С вступлением в Таможенный союз (ТС) Федеральная таможенная служба отойдет от нетарифного регулирования (квотирование, лицензирование, стандартизация) и перейдет на Интернет-декларирование грузовой таможенной декларации — другую форму подачи электронной грузовой декларации, нежели электронное декларирование. Это позволит наладить систему межведомственного обмена информацией между контролирующими органами РФ, что уже находит отражение в нормативных документах и реализуется на практике таможенными органами по каждому из направлений концепции электронного правительства (G2C, G2B, G2E, G2G).

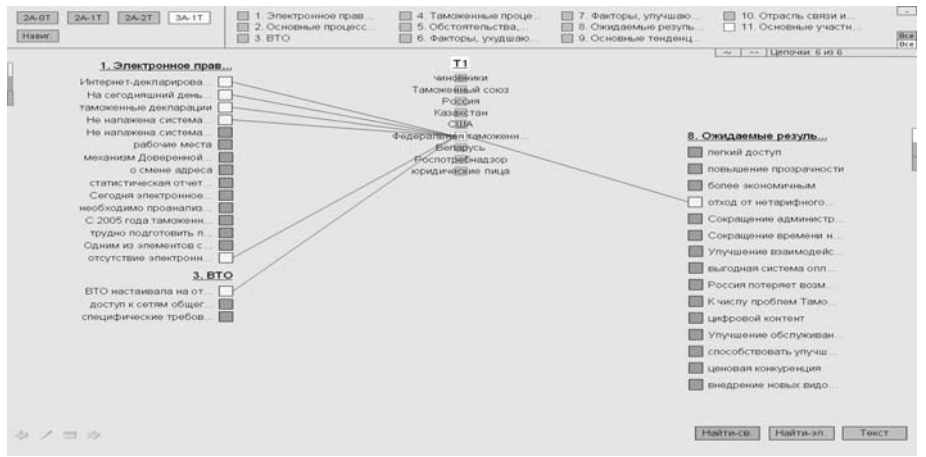


Рис. 5. Пример ССО по проблеме "Электронное правительство в условиях вхождения России в ВТО и Таможенный союз"

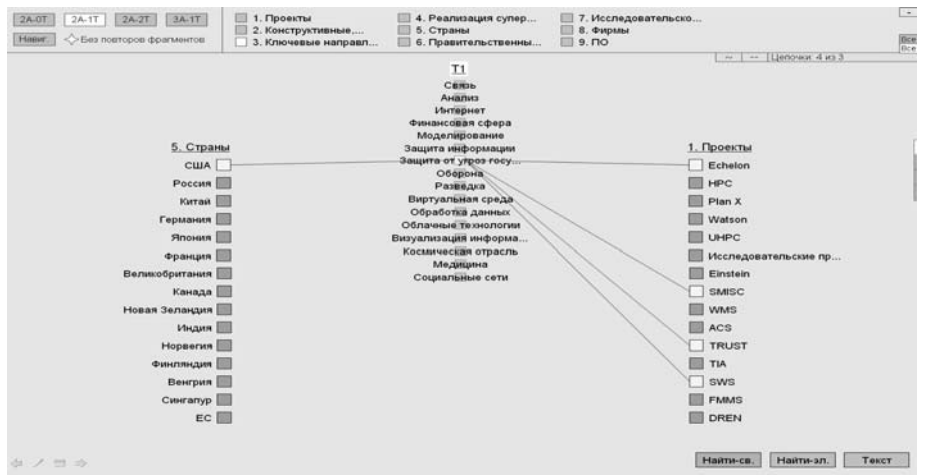


Рис. 6. Пример ССО по проблеме "Использование суперкомпьютеров для поддержки перспективных систем информационных технологий"

для поддержки перспективных сетевых информационных технологий"**.

Направления развития

Проведенные исследования и эксплуатация РАИТ для анализа различных проблем позволила выявить ключевые направления развития предлагаемой технологии "context mining":

1. *Совершенствование интерфейса конечного пользователя.* Очевидно, что ключевой процедурой в реализации технологии является восприятие ССО пользователем. Скорость распознавания и интерпретация ССО во многом определяют эффективность технологии. Развитие интерфейса должно идти, прежде всего, в направлении учета возможностей пользователя по восприятию структурно-образной информации. Эти возможности у каждого

** Приоритетным направлением борьбы с противоправными организациями в сети Интернет становится прогнозирование развития социально-политической ситуации (проект SWS) и оперативное выявление и противодействие преступному сообществу, в первую очередь, в социальных сетях (проект SMISC).

человека существенно различаются как количественно, так и качественно, соответственно интерфейс должен различаться числом выводимых элементов и связей, а также их представлением (числом знаков, цветом, местом, наличием пересечений). Кроме этого интерфейс должен настраиваться на аналитическую задачу, которую решает пользователь, и уровень его ассоциативного мышления.

2. *Совершенствование алгоритмического обеспечения в целях сокращения степени неоднозначности выводимых ССО.* Одним из ограничений предлагаемой технологии является неоднозначность восприятия ССО, в частности, транзитных связей. Алгоритмы должны быть направлены на уточнение условий образования транзитных связей за счет более детальных условий по пересечению соответствующих фрагментов (совпадение терминов в предложениях, совпадение элементов паспорта во фрагментах).

3. *Развитие сферы применения технологии за счет более разнообразной природы анализируемых проблем.* В настоящее время в качестве исходной выступают проблемы социально-экономического, общественно-политического характера. В то же время многоаспектность и зависимость от макроконтекста рассмотрения характерны практически для любой тематики и предметной области. В связи с этим создание продуктов и методик работы, реализующих контекстную технологию для различных предметных областей, является одним из приоритетных направлений развития предлагаемой технологии.

Реализацию указанных направлений развития целесообразно осуществлять в виде отдельных специализированных продуктов, реализующих технологию "context mining", но имеющих функциональные и технологические особенности.

Разнообразие возможных направлений развития и при этом существенные технологические и функциональные особенности перспективного семейства продуктов позволяют сделать вывод о появлении нового направления развития информационных технологий анализа текстовой информации.

Выводы

- ♦ Предлагаемый подход к анализу текстов учитывает контекст употребления терминов в тексте и позволяет работать не только с объектно-ориентированными сущностями, что отличает его от большинства существующих подходов к интеллектуальной обработке текстов.
- ♦ Контекстные технологии ориентированы на использование уникальных возможностей пользователя воспринимать и интерпретировать образную и структурную информацию, используя ассоциативное мышление.
- ♦ Предлагаемые технологии могут быть использованы для поддержки решения широкого круга аналитических задач, включая уточнение информационно-аналитической потребности пользователя, анализ и выявление неявных связей и

предпочтительных вариантов из множества возможных.

- ♦ Предлагаемые технологии имеют не автоматический характер, поэтому существуют ограничения по пропускной способности, что обеспечивает большую глубину анализа. На данном этапе развития предпочтительной областью использования являются задачи анализа неструктурированных текстовых материалов объемом до 1 Гбайт, при этом время получения полезного результата в зависимости от типа задачи лежит в пределах 0,5...2 ч.
- ♦ Развитие контекстных технологий позволит существенно продвинуться в решении одной из актуальных проблем обработки неструктурированной информации, а именно уменьшить вторичную информационную перегрузку пользователя, когда после первичного поиска информации по тематике из различных источников, включая сеть Интернет, он сталкивается с необходимостью анализировать десятки и сотни Мбайт отобранной неструктурированной информации.
Автор благодарит В. Н. Иванова, О. М. Исайко, В. В. Михайлова, В. А. Титова за плодотворное обсуждение полученных результатов.

Список литературы

1. **Галасин В. А., Лакаев А. С.** Расчет характеристик надежности ретрансляционных сетей на основе метода декомпозиции // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1978. № 6. С. 121—126.
2. **Лакаев А. С., Иванов В. Н.** Математическая основа метода структурного индексирования и анализа текстовой информации // Качество. Инновации. Образование. 2009. № 10. С. 72—74.
3. **Изобретение.** Способы автоматизированной обработки информационных материалов для персонализированного использования (пат. РФ № 2096824, пат. США № US 6298350 В1, Европейский пат. No. 0897158, национальный пат. Франции № 0897158, национальный пат. Германии № 69632835.9-08).
4. **Stuart K., Jock K. C., Mackinlay C. D., g Shneiderman B.** Readings in information visualization: Using vision to think // San Diego, CA: Academic Press. 1999.
5. **Keim D. A., Mansmann F., Schneidewind J., Thomas J., Ziegler H.** Visual analytics: Scope and challenges // Visual Data Mining. 2008.
6. **Kosara R.** Visual Analytics // ITCS 4122/5122, Fall 2007. Retrieved 28 June 2008.
7. **Keim D., Andrienko G., Fekete J.-D., Gorg C., Kohlhammer J. and Melancon G.** Visual analytics: Definition, process, and challenges // Information Visualization. Springer, 2008. P. 154—175.
8. **Chen C.** Information Visualization, Beyond the Horizon. Springer, July 2004.
9. **Wong, P., g Thomas, J.** Visual analytics // IEEE Computer Graphics and Applications, 2004. N 24 (5). P. 20—21.
10. **Daniel Keim, Jörn Kohlhammer, Ellis and Florian Mansmann** Mastering the Information Age // Solving Problems with Visual Analytics. Thomas Müntzer. 2010.
11. **Капитонов О. А., Тютюник В. М.** Логико-лингвистическая модель семантической разметки вебстраниц // Фундаментальные исследования. 2013. № 1.
12. **Седова Я. А., Квятковская И. Ю.** Интеллектуальный анализ корпуса документов научной информации // Астраханский гос. техн. универ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2011. № 1.
13. **Машечкин И. В., Петровский М. И., Царев Д. В.** Методы вычисления ревалентности фрагментов текста на основе тематических моделей в задаче автоматического аннотирования // Вычислительные методы и программирование. Научно-исслед. вычислит. центр МГУ им. М. В. Ломоносова. 2013. Т. 14.
14. **Мангалова Е. С., Агафонов Е. Д.** О проблеме выделения информативных признаков в задаче классификации текстовых документов // Вестник Томского государственного университета. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. № 1.

А. Н. Четырбоцкий,

д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,

e-mail: chetyrbotsky@yandex.ru,

Дальневосточный геологический институт

ДВО РАН,

Дальневосточный федеральный университет

Численное 2D-моделирование теплового потока в верхней мантии Земли

В рамках приближения Обербека—Бусинеска рассмотрена термогравитационная 2D-конвекция в верхней мантии Земли. На границе астеносфера—литосфера принимаются допущения о том, что динамика теплоты определяется ее потоком с ближнего к границе слоя астеносферы, рассеиванием части теплоты вдоль границы и расходами теплоты на плавление вещества литосферы. Численное решение определяющих уравнений выполняется в переменных функция тока — завихренность. Приводится итерационная схема их решения. Обсуждаются вопросы программной реализации аппарата численного моделирования. Показано, что при таких крайних условиях в рассматриваемой системе формируется квазипериодический режим колебаний теплоты.

Ключевые слова: моделирование, тепловой поток, конвекция

Введение

Согласно исследованиям основным движущим механизмом динамики глубинных геосфер и дрейфа материков является крупномасштабная мантийная конвекция. Достоверность этого утверждения обусловлена тем, что вещество мантии ведет себя как твердое тело только при быстро меняющихся нагрузках, а при длительных нагрузках оно способно течь как вязкая жидкость [6]. Важность изучения мантийной конвекции определяется ее значимостью при рассмотрении динамики вещества геосфер, строения и свойств периферических оболочек Земли. Самостоятельный интерес представляет изучение процессов в зоне контакта разных механизмов переноса теплоты: конвективного в сравнительно маловязкой астеносфере и кондуктивного в твердой литосфере.

Для мантийной конвекции принимается положение, что она имеет химико-плотностную природу [4, 7]. Для ее моделирования используются уравнения Стокса обычно в приближении Обербека—Бус-

синеска (ОБ) [2]. Решение задач выполняется для разных представлений вязкости. Так, Маккензи [19] в терминах завихренности — функция тока изучил тепловую конвекцию в среде с постоянной вязкостью, а Гарнис [17] — в среде, где вязкость экспоненциально возрастает с глубиной. На основании результатов проведения сейсмической томографии В. П. Трубицын [12] теоретически обосновал построение модели тепловой конвекции в верхней мантии.

Несмотря на широту охвата проблем верхне-мантийной конвекции [16, 20, 21] на должном уровне не рассматривается формализация условий в зоне контакта реологически контрастных сред. Принимается, что литосфера повсеместно подстилается астеносферой, вязкость которой на один — два порядка меньше таковой у литосферы. Между тем, именно здесь создаются условия для плавления вещества литосферы. На его реализацию затрачивается определенная тепловая энергия.

Известен ряд способов разрешения указанных проблем. В частности, в работе [3] моделью литосферы выступает высоковязкий кондуктивный слой квазизжидкости с нулевой скоростью движения его вещества. Моделью остальной части является несжимаемая жидкость, реологические свойства которой характеризуются конкретным представлением вязкости. Суммарное воздействие на литосферу происходящих в мантии процессов определяется заданием на нижней границе литосферы постоянного теплового потока. Проскальзывание на границах области обычно принимается в качестве граничных условий для скорости мантийного течения.

При решении задач обычно полагается постоянность граничных условий. Между тем, на границах могут создаваться условия для активизации цикличности работы присутствующих на границе астеносфера — литосфера магматических очагов. Цель настоящей работы как раз и заключается в изучении способов решения указанных вопросов. Рассматривается схема решения нелинейных модельных уравнений, обсуждаются проблемы программной реализации аппарата численного моделирования.

Математическая модель конвекции верхней мантии

Модельным представлением верхней мантии здесь выступает вязкая несжимаемая жидкость в поле силы тяжести. Полагается, что литосфера везде подстилается астеносферой. Для численного моделирования конвекции используются 2D-уравнения Стокса в приближении ОБ [5]:

$$\partial \sigma_{ij} / \partial X_j + \rho_0 \alpha g \delta_{i,2} T' = 0, \quad (1)$$

где $i, j = 1, 2$; $X = (X_1, X_2)$ переменные декартовой системы координат ($X_1 = X_2 = 0$ в левом нижнем углу); ось X_1 направлена слева направо, а ось X_2 направлена вверх; ρ_0 — характерное для верхней мантии значение плотности; α — коэффициент термического расширения; g — ускорение силы тяжести; δ_{ij} — символ Кронекера; $T' = T'(X, t)$ — температура среды в точке X в момент времени t ; $\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij}$ — тензор напряжений; p — давление; $\tau_{ij} = \eta'(\partial V_1/\partial X_2 + \partial V_2/\partial X_1)$ — тензор вязких напряжений; η' — вязкость (функция температуры и давления) вещества среды; V_i — составляющие вектора скорости среды, которые удовлетворяют условию неразрывности жидкости $\partial V_1/\partial X_1 + \partial V_2/\partial X_2 = 0$.

В приближении ОБ (изменение плотности учитывается только при записи ρg) и принятых обозначениях запись общего уравнения переноса теплоты в вязкой жидкости принимает вид [5]

$$\begin{aligned} & \partial T'/\partial t' + \partial(V_i T')/\partial X_i = \\ & = \chi \nabla^2 T' + (\eta/2c_p \rho_0)(\partial V_1/\partial X_2 + \partial V_2/\partial X_1)^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где t' — текущее время; χ — коэффициент теплопроводности; c_p — теплоемкость вязкой жидкости; $\nabla^2 = \partial^2/\partial X_1^2 + \partial^2/\partial X_2^2$ — оператор Лапласа.

Обезразмеривание (1)–(2) выполняется стандартным образом:

$$\begin{aligned} (x, y) &= (X_1, X_2)/H; \\ t &= t' H/V_0; \\ T &= (T' - T^*)/\Delta T; \\ \eta &= \eta'/\eta_0 R_a = \alpha g \rho_0 H^3 \Delta T / \chi \eta_0, \end{aligned}$$

где H — характерный вертикальный размер области (здесь он равен толщине верхней мантии без толщины литосферы); V_0 — характерное значение скорости верхнемантийных течений; $\Delta T = T_* - T^*$ — характерный для верхней мантии диапазон изменения ее температуры; T_* — температура на нижней подошве верхней мантии, а T^* — температура фазового перехода; R_a — число Рэлея.

В зависимости от значения характерной скорости V_0 существуют два способа представления (1). Здесь для V_0 принимается соотношение $V_0 = \chi/H$, которое при $R_a < 10^7$ следует использовать для численного моделирования [17].

В переменных функция тока — завихренность безразмерные уравнения модели трансформируются в уравнение для завихренности ξ

$$\begin{aligned} & \nabla^2(\eta \xi) = \\ & = -R_a \frac{\partial T}{\partial x} - 2 \left[\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} \right], \end{aligned} \quad (3)$$

уравнение Пуассона для функции тока ψ

$$\nabla^2 \psi = -\xi \quad (4)$$

и безразмерное уравнение переноса теплоты в вязкой жидкости

$$\begin{aligned} & \partial T/\partial t + \partial(uT)/\partial x + \partial(vT)/\partial y = \\ & = \nabla^2 T + b_T \eta (\partial u/\partial y + \partial v/\partial x)^2, \end{aligned} \quad (5)$$

где $b_T = \eta_0 \chi / (2c_p \rho_0 H^2 \Delta T)$. Вторым член в правой части (5) характеризует скорость тепловыделения за счет вязкой диссипации, а вычисление скоростей u и v следует их определению [5]: $u = \partial \psi / \partial y$ и $v = -\partial \psi / \partial x$. В силу чего условие неразрывности выполняется автоматически.

Граничные условия для T определяются следующим образом: полагается теплоизолированность $\partial T/\partial x = 0$ вертикальных границ и $T = 1$ на дне верхней мантии. Поскольку формулировке условий на границе $A \cap L$ астеносферы (A) и литосферы (L) не уделяется должного внимания, то представляется полезным их частное рассмотрение. Далее везде полагается, что эта граница соответствует верхнему слою области вычислений.

При постановке на границе $A \cap L$ условия для T учитываются изменения потоков теплоты при ее переходе. Изменения вызваны различием сред и затратами теплоты на частичное плавление вещества литосферы. Поскольку продолжительность плавления занимает некоторое время, то имеет место запаздывание его дальнейшего следования в периферийные геосферы. Эта ситуация может привести к аккумуляции теплоты и росту давления непосредственно на нижней стороне границе $A \cap L$. В зависимости от толщины литосферы и геодинамической обстановки на ней создаются условия для последующего ее пульсирующего разогрева.

При построении модели учитывался тот факт, что на тепловую энергию Q участков границы влияет теплота только с ближайшего к границе слоя астеносферы. Допускается его латеральное рассеивание (диффузия теплоты) и его затраты на фазовый переход. Полагается, что такие расходы пропорциональны Q . Тогда

$$[\partial Q/\partial t + \partial(vQ)/\partial y]_{A \cap L} = \partial(D_Q \partial Q/\partial x)/\partial x|_{A \cap L} - \gamma Q|_{A \cap L},$$

где γQ — затраты теплоты (реализация фазового перехода на $A \cap L$); γ — коэффициент пропорциональности; D_Q — теплопроводность границы. Это соотношение, по своей сути, есть записанное в консервативной форме одномерное уравнение переноса теплоты с рассеиванием его вдоль нее: левая часть характеризует динамику притока/оттока теплоты к границе астеносферы и литосферы, а правая часть — рассеивание теплоты и ее затраты на плавление литосферы. Подстановка в него соотношения для $dQ \equiv c_p \rho dT$ [9] приводит к такому уравнению для T на $A \cap L$:

$$[\partial T/\partial t + \partial(vT)/\partial y]_{A \cap L} = \partial(D_Q \partial T/\partial x)/\partial x|_{A \cap L} - \gamma T|_{A \cap L},$$

где c_p, ρ — теплоемкость и плотность вещества границы. Здесь $\gamma/c_p \rho$ обозначено через γ . Граница $A \cap L$

Алгоритм численного моделирования

определяется множеством $\{(x, y), y = 1\}$. В геодинамике традиционно принимается отсутствие в толще литосферы течений ее вещества. Поэтому $v(x, 1 + \Delta y, t) = 0$ при $x \in A \cap L$, где Δy — дискретность вертикальной координаты. Запись уравнения для T по схеме центральной разностной аппроксимации конвективного члена $\partial(vT)/\partial y$ принимает вид

$$dT(x, 1, t)/dt = D_Q \partial^2 T / \partial x^2 + (2\Delta x)^{-1} v(x, 1 - \Delta y, t) T(x, 1 - \Delta y, t) - \gamma T(x, 1, t), \quad (6)$$

где d/dt — изменение в единицу времени величины в конкретной точке; Δx — принятая при моделировании дискретность горизонтальной координаты. Согласно (6) динамика T для участков границы $A \cap L$ определяется ее рассеиванием вдоль горизонтального направления (первый член правой части), притоком/оттоком теплоты из ближайшего к ней слоя астеносферы (второй член) и затратами на плавление (третий член). Понятно, что при восходящем потоке $v(x, 1 - \Delta y, t) > 0$ следует приток теплоты к участкам границы, а при нисходящем потоке $v(x, 1 - \Delta y, t) < 0$ — его отток.

Граничные условия для функции тока ψ имеют вид: заданы условия проскальзывания ($\psi = 0$ и $\partial^2 \psi / \partial n^2 = 0$) на всех границах, кроме участков $A \cap L$, где имеет место прилипание ($\psi = 0$ и $\partial \psi / \partial n = 0$). Тогда на ней завихренность ξ определяется соотношением Тома [10]

$$\xi = -2\psi(x, 1 - \Delta y, t) / \Delta y^2. \quad (7)$$

На остальных границах вычислительной области ξ равна нулю.

В пренебрежении рассеиванием теплоты вдоль $A \cap L$ соотношение (7) можно записать в виде

$$dT(x, 1, t)/dt = f(t) - \gamma T(x, 1, t),$$

где $f(t)$ — 2-й член правой части (7). Его решение имеет вид

$$T(x, 1, t) = \int_0^t f(\tau) \exp[-\gamma(t - \tau)] d\tau.$$

Если $f(T)$ представлена рядом Фурье, то

$$T(x, 1, t) = \sum_p \frac{\omega_p}{2\omega_p + \gamma^2} \left[f_{p,1} \left(\sin \omega_p t + \frac{\gamma}{\omega_p} \cos \omega_p t \right) + f_{p,1} \left(\cos \omega_p t + \frac{\gamma}{\omega_p} \sin \omega_p t \right) \right],$$

где $\{f_{p,1}, f_{p,2}\}$ — коэффициенты разложения $f(t)$ рядом Фурье, $\{\omega_p\}$ соответствующие частоты. Из соотношения для $T(x, 1, t)$ следует, что при $p \rightarrow \infty$ (высокие частоты $\omega_p \rightarrow \infty$) под знаком суммы первый сомножитель правой части (он порядка $1/\omega_p$) стремится к нулю. Таким образом, на границе $A \cap L$ происходит подавление высокочастотных вариаций распределения температуры верхней мантии.

Областью рассмотрения здесь является прямоугольник, размер вертикальных сторон которого равен глубине верхней мантии H , а горизонтальный размер — L . Тогда безразмерный вертикальный размер принимается равным 1, а L/H — ширина. Дискретизация вычислений выполняется по x, y и t с постоянным шагом: $x_i = i\Delta x, i = 1 \dots N, \Delta x = 1/(N - 1); y_j = j\Delta y, j = 1 \dots M, \Delta y = L/H(M - 1); t_k = k\Delta t, k = 1 \dots K, \Delta t = 1/(K - 1)$.

Алгоритм решения уравнений модели состоит в нахождении заданных на регулярной пространственно-временной сетке $\{x_p, y_j, t_k\}$ значений

$\{T_{i,j}^k, \psi_{i,j}^k, \xi_{i,j}^k, u_{i,j}^k, v_{i,j}^k\}$. При известных в момент $t = t_k$ значениях для вычисления $\{T_{i,j}^{k+1}, \psi_{i,j}^{k+1}, \xi_{i,j}^{k+1}, u_{i,j}^{k+1}, v_{i,j}^{k+1}\}$ в момент $t = t_{k+1}$ требуется выполнить цикл из трех последовательных шагов.

Первый шаг. На первом шаге решается уравнение (3), для чего обычно используется метод стабилизирующей поправки [18]. Этот метод представляет собой итерационную двухшаговую процедуру, на каждом шаге которой требуется вычислить элементы матрицы линейной системы уравнений. Также требуется вычислять частные производные вплоть до четвертого порядка. Более эффективной является рассмотренная в работе [17] итерационная процедура. Сначала вводится переменная

$$\varphi_{i,j}^{k+1} = \nabla^2 (\eta \xi)_{i,j}^{k+1}.$$

Тогда алгоритм нахождения $\{\xi_{ij}^{k+1}\}$ состоит из последовательности операций:

1) $(\varphi_{i,j}^{k+1})^{m+1} = (1 - \delta)(\varphi_{i,j}^{k+1})^m + \delta \{-R_a L_x(T_{i,j}^k) - 2[w_1 L_{xx} + w_2 L_{yy} - 2w_3 L_x L_y](\psi_{i,j}^{k+1})^m\}$, где m — номер итерации. Операторы L_x, L_y, L_{xx}, L_{yy} и выражения w_1, w_2, w_3 вводятся так: $L_x = \{-1, 0, 1\}/2\Delta x, L_y = \{-1, 0, 1\}/2\Delta y, L_{xx} = \{1, -2, 1\}/\Delta x^2, L_{yy} = \{1, -2, 1\}/\Delta y^2, w_1 = L_{yy}(\eta_{i,j}^k), w_2 = L_{xx}(\eta_{i,j}^k), w_3 = L_x L_y(\eta_{i,j}^k)$. Величина $\eta_{i,j}^k = \eta(T_{i,j}^k, y_j)$ — это вязкость на глубине y_j , температура которой равна $T_{i,j}^k$.

В рассматриваемом здесь случае полагается гидростатичность давления. При такой записи разностные операторы аппроксимируют соответствующие частные производные со вторым порядком точности, а полученные соотношения соответствуют центральным трехточечным разностным схемам;

$$2) \varepsilon = \max_{i,j} |(\varphi_{ij}^{k+1})^{m+1} - (\varphi_{ij}^{k+1})^m|;$$

3) для функции $(\varphi_{ij}^{k+1})^{m+1} \equiv ((\eta\xi)_{ij}^{k+1})^{m+1}$ решается уравнение Пуассона (4), после чего делением его на $\eta_{i,j}^k$ вычисляется $(\xi_{ij}^{k+1})^{m+1}$;

4) для функции $(\psi_{ij}^{k+1})^{m+1}$ решается уравнение Пуассона (4);

5) если $\varepsilon > \varepsilon_0$, то надо вернуться к п. 1, в ином случае — выход из процедуры вычисления искомого решения (ξ_{ij}^{k+1}) .

На границе $A \cap L$ выполняется условие прилипания верхнемантийного течения $u_{i,M}^{k+1} = v_{i,M}^{k+1} = 0$, которое в терминах завихренность — функция тока записывается в виде $\xi_{i,M}^{k+1} = -2\psi_{i,M-1}^{k+1}/\Delta y^2$. Поскольку на остальных границах выполняется условие проскальзывания $\partial^2\psi/\partial n^2 = 0$, то на них

$$\xi_{1,j}^{k+1} = \xi_{N,j}^{k+1} = \xi_{i,1}^{k+1} = 0.$$

Согласно определению функции тока она принимает нулевые значения на границах области вычислений. Поэтому на них выполняются соотношения

$$\psi_{1,j}^{k+1} = \psi_{N,j}^{k+1} = \psi_{i,1}^{k+1} = \psi_{i,M}^{k+1} = 0.$$

Выполненные при $\delta = 0,5$ и $\varepsilon_0 = 3 \cdot 10^{-3}$ вычислительные эксперименты показывают быструю сходимость алгоритма для каждого временного шага (обычно m не превосходило значение 6).

В третьем и четвертом блоках алгоритма нахождения $\{\xi_{ij}^{k+1}\}$ из уравнения (3) и $\{\psi_{ij}^{k+1}\}$ из уравнения (4) требуется решить уравнение Пуассона. Для их решения эффективной является основанная на прямом методе процедура [14]. В ней искомая матрица решений уравнения заменяется эквивалентным ей вектором соответствующей размерности. Сформированная для вычисления такого вектора матрица коэффициентов не зависит ни от номера временного слоя k , ни от номера итерации m . Одна и та же матрица используется как для решения (3), так и для решения (4). Поскольку она относится к типу разреженных матриц (ее заполнение не превышает 36 %), то целесообразным является хранение в памяти компьютера только ее не нулевых элементов. Кроме того, поскольку для детального анализа конвекции требуются мелкие пространственные шаги, что соответствует высокой размерности матрицы, то вместо ее обращения разумным видится использование процедуры LU разложения такой матрицы на произведение нижней и верхней треугольных матриц.

Второй шаг. На втором шаге для нахождения скорости надо численно выполнить дифференцирование функции тока

$$u_{i,j}^{k+1} = L_y \psi_{i,j}^{k+1} \text{ и } v_{i,j}^{k+1} = -L_x \psi_{i,j}^{k+1}.$$

Третий шаг. Для решения уравнения теплопереноса используется неявная схема переменных на-

правлений (продольно-поперечная схема [11,8] или схема дробных шагов [12]). Согласно этой схеме искомое численное решение определяется соотношениями

$$\begin{aligned} & (T_{i,j}^{k+1/2} - T_{i,j}^k)/2\Delta t + L_x(u_{i,j}^{k+1} T_{i,j}^{k+1/2}) - \\ & - L_{xx} T_{i,j}^{k+1/2} = -L_y(v_{i,j}^{k+1} T_{i,j}^k) + L_{yy} T_{i,j}^k + f(T_{i,j}^k); \\ & (T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^{k+1/2})/2\Delta t + L_y(v_{i,j}^{k+1} T_{i,j}^{k+1}) - L_{yy} T_{i,j}^{k+1} = \\ & = -L_x(u_{i,j}^{k+1} T_{i,j}^{k+1/2}) + L_{xx} T_{i,j}^{k+1/2} + f(T_{i,j}^{k+1/2}); \\ & f(T) = \eta(T, y_j)(L_y u_{i,j}^{k+1} + L_x v_{i,j}^{k+1})^2, \end{aligned} \quad (8)$$

где составляющие вектора скорости являются уже известными.

При записи граничных условий для температуры используются конечно-разностные аппроксимации частных производных второго порядка точности. Так, на вертикальных границах:

$$\begin{aligned} (\partial T/\partial x)_{1,j} &= -(11T_{1,j} - 18T_{2,j} + 9T_{3,j} - 2T_{4,j})/6\Delta x; \\ (\partial T/\partial x)_{N,j} &= (11T_{N,j} - 18T_{N-2,j} + 9T_{N-3,j} - 2T_{N-4,j}). \end{aligned}$$

Так как границы теплоизолированные, то $T_{1,j} = (18T_{2,j} - 9T_{3,j} + 2T_{4,j})/11$ и $T_{N,j} = (18T_{N-2,j} - 9T_{N-3,j} + 2T_{N-4,j})/11$. Так как эти соотношения используются для дробного $(k + 1/2)$ -го слоя и целого $(k + 1)$ -го слоя, то при их записи отсутствуют индексы временных слоев. Согласно выражениям для $T_{1,j}$ и $T_{N,j}$, температура на вертикальных границах вычисляется на основании трех последующих/предшествующих внутренних вертикальных слоев. То есть при заданных граничных условиях для расчетов по схеме (8) требуется выполнить $i = 2 \dots N - 1$ таких вычислений. После подстановки $T_{1,j}$ и $T_{N,j}$ в левую часть первого уравнения (8) результаты действия сеточных операторов L_x, L_{xx} в узлах (x_2, j) и (x_{N-1}, j) явным образом не содержат значения на вертикальных границах и принимают вид

$$\begin{aligned} L_x T_{2,j} &= -2(T_{2,j} - T_{3,j})/3\Delta x; \\ L_{xx} T_{2,j} &= -2(T_{2,j} - T_{3,j})/3\Delta x; \\ L_x T_{N-1,j} &= -2(T_{N-2,j} - T_{N-1,j})/3\Delta x; \\ L_{xx} T_{N-1,j} &= 2(T_{N-2,j} - T_{N-1,j})/3\Delta x^2. \end{aligned}$$

Поскольку на вертикальных границах горизонтальная скорость равна нулю, то во втором члене левой части первого уравнения (8) граничные значения T не учитываются.

Реализация вычислительной схемы (8) по каждому направлению выполняется методом прогонки. Поскольку матрицы соответствующих линейных систем имеют трехдиагональную структуру, то вместо квадратной матрицы достаточно хранить и использовать только три ее вектора.

В рамках рассматриваемой модели температура на границе $A \cap L$ определяется решением уравнения (8)

$$T_{i,M}^{k+1} = D_Q \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{i-1,M}^k + T_{i+1,M}^k) + \left(1 - 2D_Q \frac{\Delta t}{\Delta x^2} - \gamma \Delta t\right) T_{i,M}^k + \frac{\Delta t}{\Delta x} v_{i,M-1}^{k+1} T_{i,M-1}^k.$$

Программная реализация данного алгоритма была выполнена в среде MATLAB.

Результаты численного моделирования

Для численного моделирования использовалось следующее представление безразмерной вязкости [16]:

$$\eta = \exp[-a_T T + a_P(1 - y)],$$

где a_T, a_P — безразмерные константы. При таком задании вязкости принимается гидростатичность давления. Начальное распределение для безразмерной температуры T задается выражением [12]

$$T(x, y, 0) = 1 - y + b_T \sin\left(\pi \frac{L}{H}\right) \cos \pi y,$$

где L, H — горизонтальный и вертикальный размеры расчетной области; b_T — неотрицательный параметр. Вертикальный профиль $T(x, y, 0)$ есть линейно возрастающая с глубиной функция, на которую накладывается малое возмущение.

Исследование структуры теплового потока верхнемантийной конвекции здесь было выполнено при следующих значениях параметров среды:

$$\begin{aligned} \alpha &= 3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, g = -9,8 \text{ м/с}^2, \\ c_p &= 1,25 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}, \chi = 9,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}, \\ T^* &= 1320 \text{ } ^\circ\text{C}, T_* = 1800 \text{ } ^\circ\text{C}, \rho_0 = 3400 \text{ кг/м}^3, \\ \eta_0 &= 3 \cdot 10^{22} \text{ Па} \cdot \text{с}, b_T = 0,001, a_T = -0,4, a_P = 2,2. \end{aligned}$$

Принимается также равенство D_Q и χ , т. е. $D_Q = 8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Вертикальный размер H определяется разностью характерного размера верхней мантии 660 км и характерной толщины литосферы 120 км, т. е. $H = 540 \text{ км}$; горизонтальный размер L был выбран равным 5400 км. Параметры численной схемы: число узлов по горизонтальному направлению $N = 80$ (шаг $\Delta h_x = 67,5 \text{ км}$), число узлов по вертикальному направлению $M = 50$ (шаг $\Delta h_y = 10,8 \text{ км}$) и число временных слоев $K = 5000$. Временной промежуток составляет H^2/χ или около 10 млрд лет, $\Delta t = 2 \text{ млн лет}$.

В рамках модели (3)–(8), заданных начальных и граничных условиях характер верхнемантийной конвекции вытекает из анализа временного изменения средних по области вычисления переменных модели, а также совместного изменения среднеквадратичной скорости V_{rms} и числа Нуссельта (рис. 1).

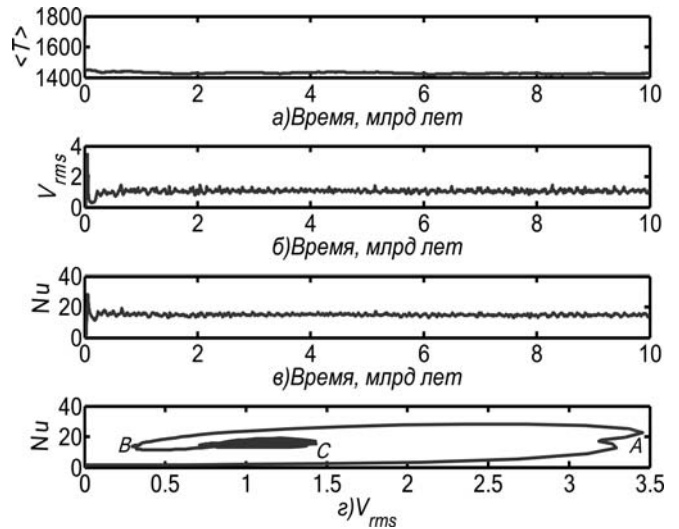


Рис. 1. Динамика средней температуры $\langle T \rangle$, среднеквадратичной скорости V_{rms} , числа Нуссельта Nu , совместное изменение V_{rms} и Nu

Распределение средней температуры $\langle T \rangle$ показывает снижение ее значений на протяжении первых 2 млрд лет (см. рис. 1, а). Далее характер ее изменения в большей степени отвечает квазипериодическому режиму колебаний, продолжительность периода которого составляет 2 млрд лет. Представляется, что такое временное поведение обусловлено сочетанием процессов конвективного прогрева и последующего за ним перемешивания вещества рассматриваемой области.

На первом этапе эволюции верхней мантии следует прогрев верхних слоев первичной астеносферы. Сам факт их существования обосновали А. В. Витязев и Г. В. Печерникова. Согласно работе [1] существенный нагрев недр части допланетных тел, дегазация, плавление и дифференциация примитивного вещества происходили уже на стадии их формирования, т. е. первые миллионы и десятки миллионов лет. Результатом этого прогрева является сначала падение ее вязкости, затем рост V_{rms} и интенсификация верхнемантийной конвекции (рост Nu) (участок 0А на рис. 1, д).

Верхняя мантия разбивается на конвективные ячейки, по периметру которых всплывают горячие и опускаются холодные объемы ее вещества.

Продолжительность этапа порядка 52 млн лет (его окончание фиксируется точкой А). Анализ рис. 2, а показывает наличие четырех областей перегретого мантийного вещества в окрестности границы астеносфера — литосфера и четырех областей охлажденного вещества на нижней границе верхней мантии. Каждый штрих показывает направление скорости, а длина — ее значение. Разные оттенки серого цвета характеризуют распределения температуры. Так, более горячие и облегченные области верхней мантии представлены светлыми оттенками, а более холодные и утяжеленные области — более темными. Понятно, что конфигурация изотерм

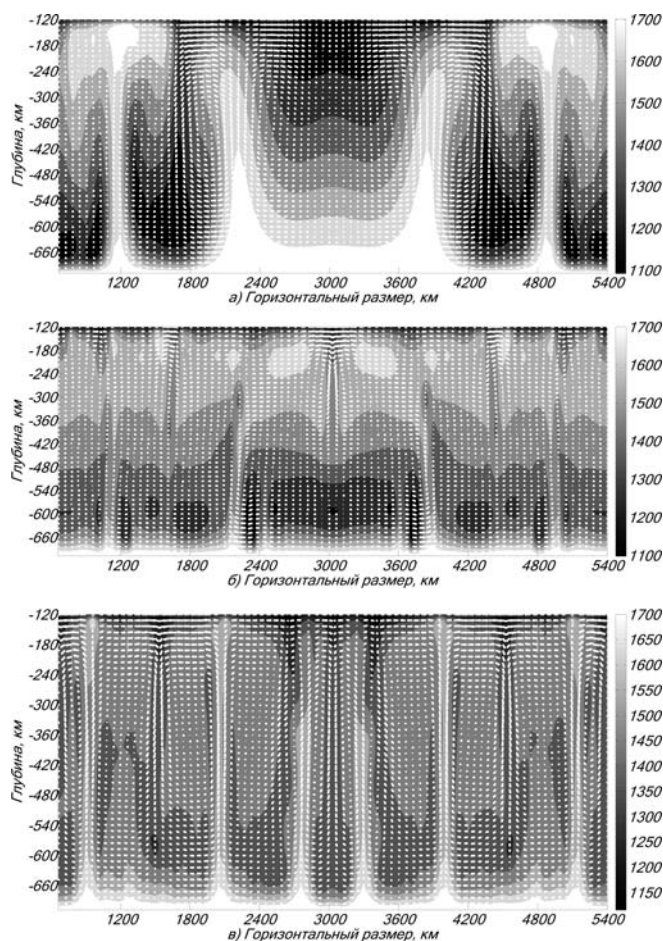


Рис. 2. Распределение T (поле скорости конвекции характеризуют стрелки):
 а — $t = 0,052$ млрд лет; б — $t = 0,180$ млрд лет; в — $t = 0,232$ млрд лет

совпадает с границей цветов. Наличие в непосредственной окрестности литосферы областей перегретого вещества вызывает рост ее температуры, а наличие областей охлажденного вещества в окрестностях дна верхней мантии — их охлаждение.

После этапа совместного роста скорости и интенсификации конвективных течений следует этап их падения (участок AB на рис. 1, z), которое вызвано сформированным к этому моменту устойчивым распределением плотности: более горячее и облегченное вещество попадает в верхние слои, а холодное и утяжеленное — в нижние слои. В результате падения скорости течения механизм прогрева отключает конвективный режим прогрева. Продолжительность этого периода порядка 64 млн лет (его окончание фиксируется точкой B). На участке BC (см. рис. 1, z) вновь следует рост температуры астеносферы (рис. 2, в). Соответствующим образом растет V_{rms} и Nu , а также снова подключается конвективный режим прогрева. Продолжительность этого этапа составляет 52 млн лет. Анализ рис. 2, в вновь показывает наличие четырех областей перегретого вещества в окрестности границы астено-

сфера — литосфера, т. е. отмечается определенная цикличность состояния верхней мантии.

Характер временного изменения температуры в течение этих этапов на границе астеносфера—литосфера непосредственно вытекает из анализа рис. 1, z . В частности, на границе сначала формируются участки перегретого вещества, которые затем остывают. Их остывание обусловлено тем, что согласно модели (8) часть теплоты на этой границе расходуется на плавление пород литосферы. Далее вновь формируются участки перегретого вещества.

Коэффициент корреляции между V_{rms} и Nu для всего рассматриваемого периода равен 0,468. Между тем, для первого этапа OA он равен 0,897, этапа AB — 0,807, для BC — 0,962 (см. рис. 1, z). При этом вычисленная на основании всего набора корреляция между переменными статистически значимо отличается от той, которая была вычислена на основании части набора. Поэтому между этапами эволюции имеются значительные отличия. При этом резкая смена одного этапа другим показывает пульсирующий механизм верхнемантийной конвекции.

Заключение

В работе на основании положения о существовании на границе литосфера—астеносфера теплового волновода рассмотрены проблемы численного 2D-моделирования теплового потока в верхней мантии Земли. Выполнена математическая формализация этого случая и приводится численный алгоритм решения поставленной задачи.

Результаты численного моделирования указывают на квазипериодический характер изменения динамических переменных рассматриваемой системы. Вместе с тем, отмечаются отличия этапов их совместного изменения. Кроме того, резкая смена одного этапа другим показывает пульсирующий механизм верхнемантийной конвекции.

Список литературы

1. **Витязев А. В., Печерникова Г. В.** Ранняя дифференциация Земли и проблема лунного состава // *Физика Земли*. 1996. № 6. С. 3—6.
2. **Джозеф Д.** Устойчивость движения жидкости. М.: Мир, 1981. 638 с.
3. **Занемонец В. Б., Котелкин В. Д., Мясников В. П.** О динамике литосферных движений // *Физика Земли*. 1974. № 5. С. 43—54.
4. **Кеонджян В. Н.** Модель химико-плотностной дифференциации мантии Земли // *Физика Земли*. 1980. № 8. С. 3—15.
5. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. М.: Физматлит. 2003. 736 с.
6. **Монин А. Н.** История Земли. Л.: Наука, 1977. 228 с.
7. **Монин А. С., Сорохтин О. Г.** Об объемной гравитационной дифференциации Земли // *ДАН СССР*. 1981. Т. 259. № 5. С. 1076—1079.
8. **Оран Э., Борис Дж.** Численное моделирование реагирующих потоков. М.: Мир, 1990. 660 с.
9. **Пригожин И., Кондепуди Д.** Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002. 461 с.
10. **Роуч П. Дж.** Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 618 с.

11. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. 616 с.

12. Трубицын В. П. Сейсмическая томография и дрейф континентов // Физика Земли. 2008. № 12. С. 83—91.

13. Трубицын В. П., Белавина Ю. Ф., Рыков В. В. Тепловое и механическое взаимодействие мантии с континентальной литосферой // Физика Земли. 1993. № 11. С. 3—15.

14. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир, 1991. Т. 1. 504 с.

15. Четырбоцкий А. Н. Приложение прямого метода решения системы линейных уравнений для численного моделирования сферического течения Куэтта несжимаемой жидкости в среде MATLAB // Информационные технологии. 2013. № 3. С. 24—30.

16. Cristensen U. Convection with pressure- and temperature-dependent non Newtonian rheology // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 1984. Vol. 77. № 2. P. 343—384.

17. Gurnis M., Davies G. F. Numerical study of high Rayleigh number convection in a medium with depth-dependent viscosity // Geophys. J. R. astr. Soc. 1985. Vol. 186, N 85. P. 523—541.

18. Houston M. H. Jr., De Bremaecker J. Cl. ADI solution of free convection in a variable viscosity fluid // J. of Comput. Physics. 1974. V. 16. P. 231—239.

19. McKenzie D. P., Roberts J. M., Weiss N. O. Convection in Earth's mantle: towards a numerical simulation. Part 3 // J. Fluid Mech., 1974. Vol. 62. P. 465—538.

20. Schubert G., Anderson C. A. Finite element calculation of very high Rayleigh number thermal convection // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 1985. Vol. 80. P. 298—318.

21. Zhong S., Gurnis M., Moresi L. Free-surface formulation of mantle convection-I. Basic theory and application to plumes // Geophys. J. Int. 1996. 127. P. 708—718.

УДК 519.7

А. Ф. Валева, д-р техн. наук, проф.,
e-mail: aida_val2004@mail.ru,
Ю. А. Гончарова, аспирант,
И. С. Кошечев, аспирант
Уфимский государственный
авиационный технический университет

Разработка логистической транспортной системы для решения задачи доставки груза различным клиентам. Часть 1

Рассматривается прототип логистической транспортной системы для решения задачи доставки груза различным клиентам (3L-EVRP, Three-Dimensional Extended Vehicle Routing Problem). Представлена математическая модель задачи 3L-EVRP, включающая следующие задачи: прогнозирование спроса, поиск рациональных маршрутов доставки груза различным клиентам, а также размещение емкостей параллелепипедной и цилиндрической форм с учетом требуемых ограничений (учет центра масс, размещения емкостей на поддонах и т. д.).

Ключевые слова: маршрутизация, размещение грузов в автомобильные транспортные средства, транспортная логистика, логистическая транспортная система

Введение

Важной задачей компании, занимающейся производством и доставкой продукции различным клиентам, является разработка логистической транспортной системы, позволяющей удовлетворить их требования точно в срок. При этом такая система должна решать целый ряд задач, связанных с раз-

мещением производимой продукции в различные транспортные средства (ТС), нахождением рациональных маршрутов доставки груза. В работе [1] предложена трехуровневая структура принятия логистических решений, позволяющая обеспечить эффективное взаимодействие таких задач внутри системы. Верхний, самый трудоемкий уровень такой структуры — стратегическое планирование, нацеленное на определение задач, анализ внутренней и внешней среды предприятия, выбор стратегии и определение альтернатив, реализацию выбранной стратегии, контроль за выполнением. Именно на этом уровне определяется объем заказа, сроки доставки, анализируются имеющиеся ресурсы, т. е. решается вопрос об эксплуатации собственных ресурсов либо о привлечении их со стороны (*outsourcing*), проводится исследование конкурентной среды, решается вопрос о создании информационной базы данных о клиентах, услугах и товарах. На следующем, сетевом уровне на основе решений, принятых на верхнем уровне, ставятся вопросы, если это необходимо, о строительстве сети объектов для обслуживания запросов клиентов. На последнем, операционном уровне решаются задачи по прогнозированию спроса, управлению запасами, транспортировке, складированию, обработке заказов. На рис. 1 представлен граф принятия логистических решений, отражающий три основных уровня.

В данной работе основное внимание уделяется задачам операционного планирования (рис. 1) — прогнозированию спроса и транспортировке. Одной из ключевых задач транспортировки является задача поиска оптимальных маршрутов для доставки груза клиентам различными автомобильными ТС. Подобные задачи известны как задачи маршрутизации ТС (*Vehicle Routing Problems, VRP*), модели и методы решения которых изложены в работах [2—5]. Широкий интерес к таким задачам комбинаторной оптимизации обусловлен как их практической востребованностью [6, 7], так и большой вычислительной



Рис. 1. Граф принятия логистических решений

трудоемкостью. В работе [8] Lenstra J. и Rinnoy K. проанализировали сложность задач VRP и показали, что большинство из них являются *NP*-трудными. С ними тесно связана задача оптимального размещения перевозимого в ТС груза, которая относится к классу задач упаковки (*Bin Packing Problem*, BPP), также являющейся *NP*-трудной. Как отдельная задача класса BPP существует задача упаковки цилиндров и параллелепипедов в контейнер. Для ее решения в работе [9] был предложен точный алгоритм, но он не позволяет решать задачи размерности, удовлетворяющей промышленным требованиям. В связи с этим в литературе большое внимание уделяется разработке эвристических и метаэвристических алгоритмов [3—5, 10—12], которые используются при решении практических задач, например, в транспортной логистике, основная цель которой — организация доставки груза клиентам "точно в срок".

В настоящее время разрабатывается программное обеспечение, нацеленное на решение задач транспортной логистики [6], основу которого составляют эффективные эвристические методы, позволяющие, например, при решении задач маршрутизации сократить транспортные расходы от 5 до 20 %.

В данной работе предлагается структура логистической транспортной системы, которая нацелена на решение следующих задач: прогнозирование спроса поставляемого клиентам груза, поиск оптимальных маршрутов доставки груза с одновременным получением карты его наилучшего размещения в автомобильных ТС. Последняя задача (3L-EVRP, *Three-Dimensional Extended Vehicle Routing Problem*) объединяет задачи маршрутизации и упа-

ковки. Статья состоит из двух частей. В первой части рассматривается математическая модель задачи 3L-EVRP, во второй части — эвристические методы ее решения в рамках логистической системы.

1. Постановка задачи доставки груза различным клиентам (3L-EVRP)

Приведем постановку задачи доставки груза различным клиентам (3L-EVRP).

Постановка задачи 3L-EVRP. Компания, производящая реагент, имеет клиентов в различных регионах России, которым поставяет свою продукцию в требуемом количестве автомобильными ТС различной грузоподъемности, арендуемыми компанией. В одном ТС находятся емкости с реагентом (используются два вида емкостей — параллелепipedной и цилиндрической форм), предназначенные для доставки нескольким клиентам. Компания располагает складом (депо) или несколькими складами для хранения сырья и произведенной продукции, каждое ТС начинает и заканчивает свой маршрут в депо. Компания может установить временной период в размере нескольких дней, в течение которых емкости с реагентом должны быть доставлены клиентам. По пути доставки емкостей с реагентом ТС разрешается остановка в некоторые интервалы времени. Кроме того, каждый клиент может быть посещен более чем одним ТС. При этом спрос каждого клиента может быть больше грузоподъемности ТС, и клиент может быть включен в несколько маршрутов. Перед транспортировкой емкости с реагентом размещают на поддонах и затем с помощью погрузчика помещают в ТС. При этом масса емкостей с реагентом и поддонов не должна превышать грузоподъемности ТС. Требуется определить: прогноз на спрос в реагенте на некоторое число месяцев на основе прогнозных значений спроса реагента за предыдущие месяцы; рациональные маршруты доставки емкостей с реагентом автомобильными ТС различным клиентам с выдачей карты наилучшего размещения емкостей в них.

На основе представленного выше графа принятия логистических решений (см. рис. 1) связь описанных выше задач можно представить в виде следующего графа (рис. 2), который отражает взаимосвязь задач составления рационального маршрута ТС и размещения в них емкостей с реагентом.

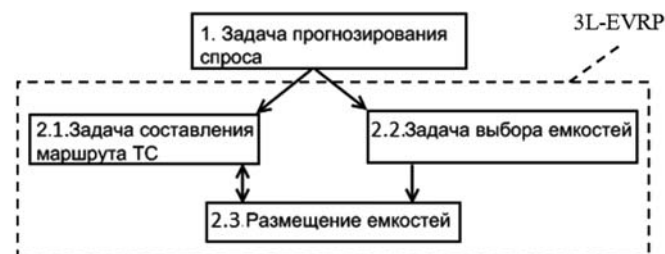


Рис. 2. Граф принятия логистических решений для задачи 3L-EVRP

2. Математическая постановка задачи 3L-EVRP

Приведем математическую постановку задачи 3L-EVRP.

Прогнозирование объемов спроса реагента. Объем спроса отдельного клиента в реагенте q_{itinit} в момент времени $tinit$, где i — индекс клиента, $i = 1, \dots, n$, $tinit$ — момент времени, порядковый номер месяца, $tinit = 1, \dots, tmonth$.

Требуется найти прогнозные значения для каждого из клиентов до конца года q_{it} , где $t = tinit + tpredict$ — период, число месяцев, на которое строится прогноз.

Для получения прогнозных значений использовался пакет Statistica.

Составление рациональных маршрутов доставки емкостей с реагентом автомобильными ТС различным клиентам. Задача составления рациональных маршрутов доставки емкостей с реагентом автомобильными ТС различным клиентам относится к задачам маршрутизации, являющимся, как известно, NP-трудными.

В основу модели рассматриваемой задачи 3L-EVRP легли модели следующих задач: задача маршрутизации ТС с временными окнами (VRP with Time Windows, VRPTW [6]), периодическая задача маршрутизации ТС (Periodic VRP, PVRP [11]), задача маршрутизации ТС с отдельной доставкой (Split Delivery VRP, SDVRP [13]), задача маршрутизации ТС с множеством депо (Multiple Depot VRP, MDVRP [12]). Обозначения, введенные в перечисленных задачах, сохраняются.

Приведем математическую модель для поиска рациональных маршрутов доставки емкостей с реагентом различным клиентам.

Дано: $G = (V, A)$ — граф с множеством вершин V и множеством дуг A ; V — множество вершин, которое делится на два подмножества $V_c = \{1, \dots, n\}$ и $V_h = \{n+1, \dots, n+k\}$; $V_c = \{1, \dots, n\}$ — множество городов и клиентов; $V_h = \{n+1, \dots, n+k\}$ — множество депо; m_u — число ТС, расположенных в каждом депо $u \in V_h$, $m_u \in \{1, \dots, r_u\}$; r_u — максимальное число ТС, расположенных в депо $u \in V_h$; Q_v — грузоподъемность ТС v из депо $u \in V_h$, $Q_v \in Z^+$, где $v \in [\underline{v}, \bar{v}]$.

Предполагается, что $\underline{v} = 1$ и $\bar{v} = r_u$; q_{it} — объем спроса в реагенте в момент времени $t = 1, \dots, tpredict$, связанный с каждым клиентом $i \in V_c$ и получаемый при решении подзадачи **Прогнозирование объемов спроса реагента**.

Введем ряд обозначений:

c_{ij} — расстояние между пунктами i и j , $i, j \in V_c$;
 e_{ij} — время в пути между пунктами i и j , $i, j \in V_c$;
 s_i — время обслуживания клиента $i \in V_c$;
 $[a_i, b_i]$ — временное окно для клиента $i \in V_c$;
 $penalty_time_i$ — штраф за начало обслуживания клиента $i \in V_c$ после b_i ;
 w_i^{vu} — время начала обслуживания клиента $i \in V_c$ ТС v из депо $u \in V_h$;

M — период планирования доставки емкостей с реагентом, дни;

x_{ij}^{vu} — переменная логического типа, принимающая значение 1, если ТС v из депо $u \in V_h$ перемещается в направлении от пункта i к пункту j , и 0 — в противном случае, $i, j \in V_c$;

y_i^{vu} — это спрос i -го клиента, обслуженного ТС v из депо $u \in V_h$;

h_z — стоимость z -й емкости, где $z = 1, \dots, |Item_{cyl}| + |Item_{par}|$;

$|Item_{cyl}|$ — число емкостей цилиндрической формы;
 $|Item_{par}|$ — число емкостей параллелепипедной формы;

vol_z — объем z -й емкости;

$num = (num_1, \dots, num_{|Item_{cyl}| + |Item_{par}|})$ — набор емкостей;

$num_{|Item_{cyl}| + |Item_{par}|}$ — число емкостей цилиндрической и параллелепипедной форм;

$itp_i \in Item_{par}$ — параллелепипеды с известной длиной lp_i , шириной wp_i , высотой hp_i , массой mp_i ($i = 1, \dots, |Item_{par}|$);

$itc_k \in Item_{cyl}$ — цилиндры с известным радиусом rc_k , высотой hc_k , массой mc_k ($k = 1, \dots, |Item_{cyl}|$);

поддоны с известной длиной $lpal_j$, шириной $wpal_j$, допустимой высотой $hpal_j$, массой $mpal_j$, грузоподъемностью $qpal_j$, максимальной допустимой высотой предметов на поддоне h_{max} ;

ТС v с известной длиной L , шириной W^v , высотой H^v , грузоподъемностью Q^v ;

$Pal = \{pal_j\}$, $pal_{vj} = 1, \dots, N_{pal}$ — множество поддонов, где $pal_j = (x_{pal_j}, y_{pal_j}, z_{pal_j})$. $(x_{pal_j}, y_{pal_j}, z_{pal_j})$ — координаты поддона, которые отсчитываются от ближнего нижнего правого края ТС v (рис. 3);

(xp_i, yp_i, zp_i) — координаты параллелепипеда, под которыми будем подразумевать координаты левого нижнего дальнего угла;

(xc_k, yc_k, zc_k) — координаты цилиндров (будем считать, что координата цилиндра — это координата центра его нижнего основания). Координаты цилиндров и параллелепипедов отсчитываются от поддона (рис. 4);

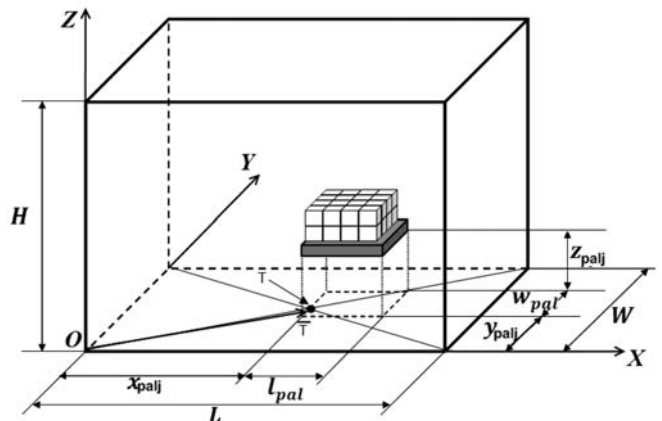


Рис. 3. Координаты поддона в ТС v

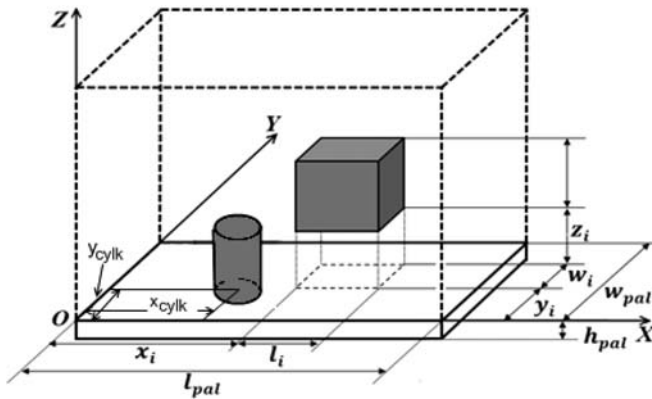


Рис. 4. Координаты предметов на поддоне

$T_v = (t_{vj})$ — вектор координат заданной точки T_v (см. рис. 3), которая является точкой пересечения диагоналей дна ТС v ;

$sp = (sp_i)$ — вектор координат центра масс i -го параллелепипеда;

$sc = (sc_k)$ — вектор координат центра масс k -го цилиндра;

f_spack_v — расстояние от центра масс размещенных емкостей с реагентом в ТС v до заданной точки T ;

$Rm_c^v = (rm_c^v)$ — вектор координат центра тяжести всех предметов, размещенных в ТС v ;

$$rm_c^v = \frac{\sum_i sp_i mp_i + \sum_k sc_k mc_k}{\sum_i mp_i + \sum_k mc_k};$$

$$f_pack^v = \frac{H_z^v}{H^v}, \text{ где } H_z^v \text{ — занятая высота ТС } v;$$

$penalty_pack^v$ — штраф за маршрут, не соответствующий рациональному размещению емкостей в ТС v .

Требуется найти:

$$\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{v=1}^{m_u} c_{ij} x_{ij}^{vu} + \sum_{i=1}^n penalty_time_i \right) \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$u = n + 1, \dots, n + k;$$

$$\sum_z h_z num_z \rightarrow \min; \quad (2)$$

$$f_spack \rightarrow \min, \quad (3)$$

при выполнении перечисленных ниже условий:

- Пройденный путь включает каждую вершину не менее одного раза

$$\sum_{i=1}^n \sum_{v=1}^{m_u} x_{ij}^{vu} \geq 1; j = 1, \dots, n; u = n + 1, \dots, n + k; \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{iz}^{vu} - \sum_{j=1}^n x_{zj}^{vu} = 0; z = 0, \dots, n; v = 1, \dots, m_u; u = n + 1, \dots, n + k. \quad (5)$$

- Отсутствуют замкнутые подмаршруты:

$$\sum_{i \in V_c} \sum_{j \in V_c} x_{ij}^{vu} \leq |V_c| - 1; v = 1, \dots, m_u; u = n + 1, \dots, n + k. \quad (6)$$

- Клиент i может быть обслужен ТС v из депо $u \in V_h$ только, если v проходит через i :

$$y_i^{vu} \leq q_{it} \sum_{j=1}^n x_{ij}^{vu}; i = 1, \dots, n; v = 1, \dots, m_u; u = n + 1, \dots, n + k; t = 1, \dots, t_{predict}. \quad (7)$$

- Спрос каждого клиента в реагенте должен быть удовлетворен:

$$\sum_{v=1}^{m_u} y_i^{vu} \leq q_{it}; i = 1, \dots, n; u = n + 1, \dots, n + k; t = 1, \dots, t_{predict}. \quad (8)$$

- Число емкостей с реагентом, размещенных в ТС v , не должно превышать грузоподъемности ТС v :

$$\sum_{i=1}^n y_i^{vu} \leq Q^v; v = 1, \dots, m_u; u = n + 1, \dots, n + k. \quad (9)$$

- Учитываются временные окна:

$$a_i \leq \sum_{v \in [y, \bar{v}]} w_i^{vu} \leq b_i; \forall i \in \{1, \dots, n\}; \quad (10)$$

$$a_i \leq w_i^{vu} \leq b_i; \forall v \in [y, \bar{v}]; i \in V_c; \quad (11)$$

$$w_j^{vu} \geq w_i^{vu} + s_i + e_{ij}; \forall i, j \in \{1, \dots, n\}; \quad (12)$$

и M — планирование доставки (в днях) емкостей с реагентом:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (e_{ij} + s_i) \leq M. \quad (13)$$

- Продукция должна вмещаться в ТС v :

$$f_pack^v = \begin{cases} \leq 1, & penalty_pack^v = 0 \\ > 1, & penalty_pack^v = \text{const}. \end{cases} \quad (14)$$

- Должны быть выбраны емкости минимальной стоимости и максимальной заполненности их реагентом:

$$num_z \geq 0, \text{ целые, } z = 1, \dots, |Item_{cyl}| + |Item_{par}|; \quad (15)$$

$$\sum_z vol_z num_z \leq q_{it}; z = 1, \dots, N; t = 1, \dots, t_{predict}, i \in V_c. \quad (16)$$

- Удовлетворяются следующие условия размещения продукции в ТС v :

— условие ортогональности для параллелепипедов:

$$\forall pal_j, \forall itp_i \in pal_j \cup Item_{par}: ((xp_r^i = xp_i) \cup (xp_r^i = xp_i + lp_i)) \cap ((yp_r^i = yp_i) \cup (yp_r^i = yp_i + wp_i)), j = 1, \dots, N_{pal} \quad (17)$$

где (xp_r^i, yp_r^i, zp_r^i) — координаты вершин параллелепипедов;

— параллелепипеды, принадлежащие одному поддону, не перекрывают друг друга:

$$\forall pal_j, \forall itp_i, itp_s \in pal_j \cup Item_{par} \\ ((xp_i \geq xp_s + wp_s) \vee (xp_s \geq xp_i + wp_i)) \vee ((yp_i \geq yp_s + lp_s) \vee \\ \vee (yp_s \geq yp_i + lp_i)) \vee ((zp_i \geq zp_s + hp_s) \vee (zp_s \geq zp_i + hp_i)), \\ i \neq s; \quad (18)$$

— параллелепипеды не выходят за грани поддонов:

$$\forall pal_j, \forall itp_i \in pal_j \cup Item_{par} \\ (xp_i \geq 0) \wedge (yp_i \geq 0) \wedge (zp_i \geq 0) \wedge \\ \wedge ((xp_i + wp_i) \leq wpal_j) \wedge ((yp_i + lp_i) \leq lpal_j) \wedge \\ \wedge ((zp_i + hp_i) < hpal_j), \\ j = 1, \dots, N_{pal}; \quad (19)$$

— условие ортогональности для цилиндров:

$$\forall pal_j, \forall itc_k \in pal_j \cup Item_{cyl} \\ \bar{a}(xc_j - xa_s, yc_j - ya_s, zc_j - za_s) \parallel \bar{b}(1, 1, 0), \\ j = 1, \dots, N_{pal}; \quad (20)$$

где (xa_s, ya_s, za_s) — координаты произвольной точки на нижнем основании цилиндра;

— цилиндры, принадлежащие одному поддону, не перекрываются:

$$\forall pal_j, \forall itc_k, itc_s \in pal_j \cup Item_{cyl} \\ ((xc_k - xc_s)^2 + (yc_k - yc_s)^2 \geq (rc_k + rc_s)^2) \vee \\ \vee (zc_s + hc_s < zc_k) \vee (zc_k + hc_k < zc_s), \\ s \neq k, j = 1, \dots, N_{pal}; \quad (21)$$

— цилиндры не выходят за грани поддона:

$$\forall pal_j, \forall itc_k \in pal_j \cup Item_{cyl} \\ (xc_k \geq rc_k) \wedge (yc_k \geq rc_k) \wedge ((xc_k + rc_k) \leq wpal_j) \wedge \\ \wedge ((yc_k + rc_k) \leq lpal_j) \wedge (zc_k \geq 0), \\ j = 1, \dots, N_{pal}; \quad (22)$$

— цилиндры и параллелепипеды, принадлежащие одному поддону, не перекрывают друг друга:

$$\forall pal_j, \forall itp_i \in pal_j \cup Item_{par}, \forall itc_k \in pal_j \cup Item_{cyl} \\ (xc_k + r_k \leq xp_i) \vee (xp_i + wpi \leq xc_k - rc_k) \\ \vee (yp_i + lp_i \leq yc_k - rc_k) \vee (yc_k + r_k \leq yp_i) \\ \vee (zc_k + hc_k \leq zp_i) \vee (zp_i + hpi \leq zc_k), \quad (23)$$

— предмет может принадлежать только одному поддону:

$$pal_1 \cup pal_2 \cup \dots \cup pal_{N_{pal}} = Item_{cyl} + Item_{par}; \\ \forall i, j = 1, \dots, N_{pal}; i \neq j, pal_i \cap pal_j = \emptyset; \quad (24)$$

— условие ортогональности для поддонов:

$$\forall pal_j; \\ ((xpal_r^i = xpal_j) \cup (xpal_r^i = xpal_j + lpal_j)) \cap \\ \cap ((ypal_r^i = ypal_j) \cup (ypal_r^i = ypal_j + wpal_j)), \\ j = 1, \dots, N_{pal}; \quad (25)$$

где $(xpal_r^i, ypal_r^i, zpal_r^i)$ — координаты вершин поддона;

— поддоны, принадлежащие одному ТС v , не пересекаются:

$$\forall pal_i, pal_s \\ ((xpal_i \geq xpal_s + wpal_s) \vee (xpal_s \geq xpal_i + wpal_i)) \vee \\ \vee ((ypal_i \geq ypal_s + lpal_s) \vee (ypal_s \geq ypal_i + lpal_i)) \vee \\ \vee ((zpal_i \geq zpal_s + hpal_s) \vee (zpal_s \geq zpal_i + hpal_i)), \\ j = 1, \dots, N_{pal}; i \neq s; \quad (26)$$

— поддоны не выходят за пределы ТС v :

$$\forall pal_j \\ (xpal_j \geq 0) \wedge (ypal_j \geq 0) \vee (zpal_j \geq 0) \wedge \\ \wedge ((xpal_j + wpal_j) \leq W^v) \vee ((ypal_j + lpal_j) \leq L^v) \wedge \\ \wedge ((zpal_j + h_{зарг.и} < H^v), \\ j = 1, \dots, N_{pal}; \quad (27)$$

— суммарный вес предметов на поддоне не превышает грузоподъемность поддона:

$$\forall pal_j, j = 1, \dots, N_{pal}; \\ \sum_{itc_k \in pal_j \cup Item_{cyl}} mc_k + \sum_{itp_i \in pal_j \cup Item_{par}} mp_i \leq qp; \quad (28)$$

— суммарный вес поддонов и предметов на них не превышает грузоподъемность ТС v :

$$\sum_{\forall pal_j} mpal_j + \sum_{pal_{j_k}} \left(\sum_{itp_i \in pal_j \cup Item_{cyl}} mc_k + \right. \\ \left. + \sum_{it_{pari} \in pal_j \cup Item_{pari}} mp_i \right) \leq Q^v. \quad (29)$$

В части 2 статьи будут изложены методы решения задачи 3L-EVRP и структура логистической транспортной системы.

Заключение

В статье приведена постановка задачи доставки груза различным клиентам (3L-EVRP, Three-Dimensional Extended Vehicle Routing Problem), ее математическая модель, объединяющая задачи прогнозирования спроса, поиск рациональных маршрутов доставки груза различным клиентам, а также размещение емкостей параллелепипедной и цилиндрической форм с учетом требуемых ограничений (учет центра масс, размещения емкостей на поддонах и т. д.).

Цель дальнейшей работы — создание оптимизационного ядра логистической транспортной системы для решения задачи 3L-EVRP, объединяющего модули, решающие все перечисленные выше задачи, в единый программный комплекс, на базе метаэвристических алгоритмов, нацеленных на поиск рациональных маршрутов доставки груза различным клиентам, а также наилучшего размещения емкостей параллелепипедной и цилиндрической форм с учетом требуемых ограничений (учет центра масс, размещения емкостей на поддонах и т. д.). Эти вопросы будут рассмотрены в части 2 статьи.

Работа поддержана грантом РФФИ № 13-07-00579.

Список литературы

1. **Langevin A., Riopel D.** Logistics Systems: Design and Optimization. New York: Springer, 2005. 388 p.
2. **Toth P., Vigo D.** The Vehicle Routing Problem. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002. 386 p.
3. **Kuo Yi.** Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem // Computers & Industrial Engineering, 2010. Vol. 39, No. 8. P. 157—165.
4. **Пожидаев М. С., Костюк Ю. Л.** Сбалансированная эвристика для решения задачи маршрутизации транспорта с учетом грузоподъемности // Вестник ТГУ (Томск). 2010. № 3 (12). С. 65—72.
5. **Hoang M., Bostel N., Langevin A., Rousseau L.-M.** An Exact algorithm and a Metaheuristic for the Generalized Vehicle Routing Problem // Logistics and Transportation. 2012. No. 73. 25 p.
6. **Schmid V., Doerner K., Laporte G.** Rich Routing Problems Arising in Supply Chain Management // European Journal of Operational Research. 2013. Vol. 224, No 3. P. 435—448.
7. **Santos L., Coutinho-Rodrigues J., Henggler C.** A web spatial decision support system for vehicle routing using Google Maps // Decision Support Systems, 2011. Vol. 51, No. 1. P. 1—9.
8. **Lenstra J., and Rinnooy K.** Complexity of vehicle routing and scheduling problems // Networks. 1981. Vol. 11, No. 2. P. 221—227.
9. **Stoyan Y. G., Chugay A.** Packing cylinders and rectangular parallelepipeds with distances between them // European Journal Operation Research 2009. Vol. 197. No. 2. P. 446—455.
10. **Luke S.** Essentials of Metaheuristics. Raleigh: Lulu, 2009. 235 p.
11. **Moghaddam R., Zohrevand A., Rafiee K.** Solving a New Mathematical Model for a Periodic Vehicle Routing Problem by Particle Swarm Optimization // Transportation Research Journal. 2012. Vol. 2, No. 1. P. 77—87.
12. **Surekha P., Dr. S. Sumathi.** Solution To Multi-Depot Vehicle Routing Problem Using Genetic Algorithms // World Applied Programming. 2011. Vol. 1, No. 3. P. 118—131.
13. **Uldry M., Widmer M., Hertz A.** Two objective functions for a real life Split Delivery Vehicle Routing Problem // Metz: Electronic Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Systems Management. 2011. P. 1290—1300.

УДК 519.816; 004.89

Е. А. Елтaренко, канд. техн. наук, доц.,
Национальный исследовательский
ядерный университет "МИФИ",
e-mail: EAeltarenko@mail.ru

Формирование коллективных предпочтений в многокритериальных задачах

На практике к решению многокритериальных задач привлекаются эксперты. Решается задача формирования групповых функций предпочтения на основе личных предпочтений экспертов. По результатам опроса экспертов определяются компоненты коллективной функции предпочтения (КФП). Рассматривается задача статистической оценки достоверности получаемой КФП.

Ключевые слова: многокритериальные задачи, описание предпочтений, экспертные методы, групповые предпочтения

Введение

На практике для решения многокритериальных задач привлекаются эксперты. Причиной привлечения экспертов может быть неготовность лица, принимающего решение (ЛПР) решать задачу потому, что у него не сформировались предпочтения,

и он затрудняется в ответах на вопросы в процессе выявления его предпочтений. В крупномасштабных задачах, когда решение затрагивает интересы группы людей или целых населенных пунктов, как, например, выбор площадки для строительства потенциально опасных объектов, без экспертов не обойтись.

В связи с этим возникает задача формирования коллективных предпочтений множества экспертов. Данная задача близка к экспертным методам формирования групповых оценок [1—3], в которых групповые оценки определяются усреднением личных. Именно так поступают в интерактивных методах [4—7], в которых описание предпочтений проводится заданием весов критериев, а процедуры агрегирования критериев фиксированы.

В методе иерархий [8, 9], в котором предпочтения альтернатив и веса критериев задаются в виде матриц парных предпочтений, соответственно оценки предпочтения заданного множества альтернатив получают в шкале отношений. Метод ориентирован на использование экспертов, поэтому процедура формирования групповых оценок четко определена (см. [9, пп. 2—13]) как среднее геометрическое личных оценок.

В методах, основанных на нечетких множествах [10], проблема агрегирования мнений экспертов не решается однозначно, для получения групповых оценок используются различные операторы агрегирования [11—13].

В методах порядковой классификации [14–16], основанных на принципах вербального анализа, при установлении классифицирующих правил используются согласованные данные многих экспертов. При этом экспертные данные проверяются на непротиворечивость.

Таким образом, в каждом классе методов (подходе к описанию предпочтений) рассматриваются вопросы формирования групповых предпочтений экспертов.

Вместе с тем, в многомерной теории полезности [17] на задаче формирования коллективной функции полезности внимание не акцентируется, так как для всех экспертов должна выполняться аксиома одной функции полезности. Однако далеко не всегда у всех экспертов совпадают мнения о виде функции полезности, и тогда либо надо принять допущение об одинаковом виде функции полезности, либо отказаться от формирования коллективной функции.

В работе [18] рассматривается задача описания предпочтений в МКЗ с иерархической системой критериев одного ЛПР, т. е. одного эксперта. В результате опроса нескольких экспертов на каждом уровне иерархии предпочтения могут описываться разными функциями предпочтения (ФП). Каждая ФП имеет несколько компонент, и для всех личных ФП выполняется единая система аксиом. Формирование коллективных предпочтений подразумевает определение компонент коллективной функции предпочтения (КФП), при этом аксиомы предпочтений должны выполняться и для КФП. Данной задаче посвящена настоящая статья, подчеркнем, что она является продолжением статьи [18]. Многие используемые понятия раскрываются в указанной статье, поэтому рекомендуется ознакомиться с ней.

1. Постановка задачи

Пусть имеются $i = 1, 2, \dots, M$ экспертов, компетентность которых характеризуются коэффициентами K^i . Предпочтения каждого из них описываются функцией [18]

$$u^i(\mathbf{k}) = \psi^i \left(\sum_{j=1}^m \psi^{i-1} (k^i V_j^i u_j^i(k_j)) \right), \quad (1)$$

включающей четыре компоненты: генерирующую функцию $\psi^i(x)$ ($\psi^{-1}(u)$ — обратная функция); масштабный коэффициент k^i ; веса критериев V_j^i

($\sum_{j=1}^m V_j^i = 1$); множество частных нормированных

функций предпочтений (ЧНФП) $u_j^i(k_j), j = 1, 2, \dots, m$.

Для предпочтений всех экспертов выполняется аксиома, приведенные в разделе 1.

Требуется разработать процедуры формирования коллективной (групповой) функции предпочтений $u^r(\mathbf{k})$ типа (1), для которой выполняются аксиомы предпочтений, т. е. получить процедуры определения всех четырех ее компонент: $\psi^r(x), k^r, V_j^r, u_j^r(k_j)$. Кроме того, для проверки достоверности получаемой КФП необходим аппарат статистической оценки.

Принципы формирования коллективных предпочтений

1. Получать данные о предпочтениях от всех экспертов необходимо в единой шкале интервалов, которая задается двумя эталонами $u(\mathbf{k}^-) = 0$ и $u(\mathbf{k}^+) = 1$. Поэтому сначала необходимо со всеми экспертами согласовать единые минимальные $\mathbf{k}^- \equiv \{k_j^-\}$ и максимальные $\mathbf{k}^+ \equiv \{k_j^+\}$ по предпочтению значения критериев.

Это относится и к текстовым критериям, которые задаются конечным множеством текстовых значений, например, в задаче выбора места работы, приведенной в статье [18], текстовым критерием может быть профессия с именами допустимых значений. Для таких критериев также необходимо согласовать минимальное и максимальное по предпочтению значения.

2. Групповые значения параметров КФП должны определяться с использованием адекватных и инвариантных статистик [19, гл. 2]. Для шкалы интервалов адекватными статистиками являются среднее, среднеквадратическое отклонение, инвариантной статистикой — коэффициент корреляции.

3. Для всех экспертов выполняются аксиомы предпочтений, в коллективных предпочтениях аксиомы тоже должны выполняться. Приведем эти аксиомы.

Используя безразмерные критерии $u_j = u_j(k_j)$, функцию предпочтения (1) запишем в виде функции предпочтения безразмерных критериев (ФПБК):

$$g(\mathbf{u}) = \psi \left(\sum_{j=1}^m \psi^{-1}(k V_j u_j) \right). \quad (2)$$

Аксиома 1 единственности нулевого значения ФПБК: $g(\mathbf{u}) = 0$ только при всех $u_j = 0$.

Аксиома 2 единственности единичного значения ФПБК: $g(\mathbf{u}) = 1$ только при всех $u_j = 1$.

Аксиома 3 монотонности предпочтений ФПБК: $g(u_j^1, \bar{u}_j) > g(u_j^2, \bar{u}_j)$, где $u_j^1 > u_j^2$ для любого допущения \bar{u}_j , т. е. $(\frac{\partial g(u_j, \bar{u}_j)}{\partial u_j} > 0)$.

Зададим произвольное значение $u' \in [0; 1]$, одинаковое для всех критериев. Используя частные нормированные функции предпочтения $u_j(k_j)$, значение u' переведем в $k_j' = u_j^{-1}(u')$.

Аксиома 4 относительной важности критериев. Для любой пары критериев k_j и k_s отношение пред-

почтений $\frac{u(k_j^+, \bar{k}_j^-)}{u(k_s^+, \bar{k}_s^-)}$ неизменно при любом значении $u' \in [0; 1]$.

В статье [18] показано, что аксиома относительной важности выполняется для функций предпочтения типа (1).

4. Необходима статистическая оценка достоверности получаемой КФП. Для отдельных компонент КФП могут быть разные оценки достоверности.

Чтобы определить процедуру построения КФП, рассмотрим подробнее функцию (1).

Четыре компоненты ФП, приведенные в постановке задачи, используются для удобства их определения в процессе опроса ЛПР (эксперта). Вместе с тем, можно уменьшить число компонент до двух.

В статье [18] рассмотрены вопросы определения компонент ФП по результатам опроса ЛПР. Так, $kV_j = u(k_j^+, \bar{k}_j^-)$, соответственно $kV_j u_j(k_j) = u(k_j, \bar{k}_j^-)$. Поэтому функция предпочтений (1) принимает вид

$$u(\mathbf{k}) = \psi \left(\sum_{j=1}^m \psi^{-1}(u(k_j, \bar{k}_j^-)) \right).$$

Функцию $u(k_j, \bar{k}_j^-) = kV_j u_j(k_j)$ назовем частной функцией предпочтения (ЧФП), она изменяется в интервале $[0; u(k_j^+, \bar{k}_j^-)]$ и определяет влияние критерия k_j на ФП. Отметим, что все ЧФП измеряются в единой шкале интервалов. Множество ЧФП является первой компонентой ФП. Вторая компонента — генерирующая функция $\psi(x)$ — определяет совместное влияние всех частных критериев. Естественно, что $\psi(x)$ идентифицируется на основе оценок предпочтений экспертов объектов с отличными от нуля $u(k_j, \bar{k}_j^-)$, а ЧФП определяются отдельно для каждого критерия при фиксированном дополнении \bar{k}_j^- .

Поэтому выделим две задачи:

- а) формирование коллективных ЧФП;
- б) идентификация генерирующей функции $\psi^r(x)$ на основе оценок предпочтений всеми экспертами множества объектов с отличными от нуля $u(k_j, \bar{k}_j^-)$.

Итак, для формирования КФП проводится опрос экспертов по единому плану, рассмотренному в статье [18], но как было сказано выше, для всех экспертов должны быть заданы согласованные нижние и верхние значения критериев $\mathbf{k}^- \equiv \{k_j^-\}$ и $\mathbf{k}^+ \equiv \{k_j^+\}$, которые определяют единую шкалу интервалов измерения предпочтений для всех экспертов.

2. Формирование коллективных частных функций предпочтения

Сначала рассмотрим числовые критерии. Как указывалось в п. 1, надо согласовать между экспертами для частных критериев единые минимальные k_j^- и максимальные k_j^+ по предпочтению значения. Если ЧФП монотонная, то требуется определить характер изменения функции — убывающая или возрастающая. Тогда значения k_j^- и k_j^+ определяют границы изменения критерия.

В случае, когда ЧНФП не монотонная, то дополнительно необходимо согласовать единое значение k_j^+ , соответствующее максимальному по предпочтению значению критерия, которое не будет на границе интервала. Кроме того следует определить и границы интервала $[k_{j \min}; k_{j \max}]$.

Отметим, что в иерархической системе критериев для всех комплексных критериев верхних уровней ЧФП — монотонно возрастающие с границами $k_j^- = 0$ и $k_j^+ = 1$.

Проведя опрос экспертов о параметрах ЧФП, получим индивидуальные нормированные функции предпочтения $u_j^i(k_j)$ (примеры функций четырех экспертов приведены на рис. 1, интервал изменения критерия согласован: $k_j^- = 20$, $k_j^+ = 120$ в физических единицах измерения), масштабные коэффициенты k^i и веса V_j^i . Кроме этого для экспертов могут задаваться коэффициенты компетентности K^i ($i = 1, 2, \dots, M$).

Отнормируем коэффициенты компетентности так, чтобы $\sum_{i=1}^M K^i = 1$.

Рассмотрим две процедуры формирования групповой ЧФП. Первая, назовем ее процедурой (а), основывается на принятых в экспертных методах. Так как ЧФП экспертов $u^i(k_j, \bar{k}_j^-)$, $i = 1, 2, \dots, m$, определены в единой шкале, групповая $u^r(k_j, \bar{k}_j^-)$ будет

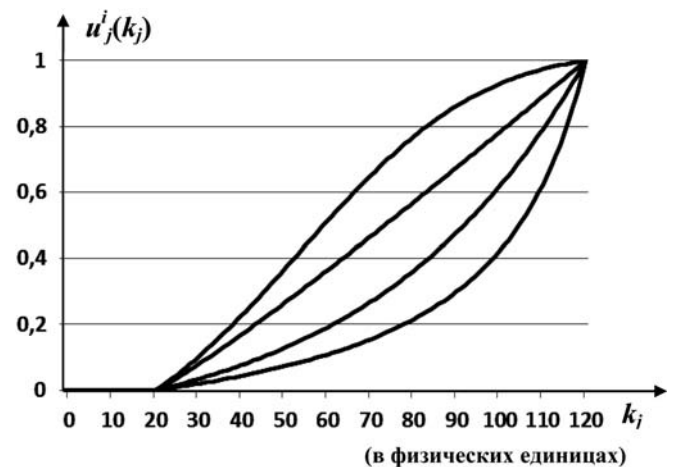


Рис. 1. ЧНФП четырех экспертов ($u_j^i(k_j)$)

определяться усреднением личных ЧФП. Имея коэффициенты компетентности экспертов K^i , для определения групповой ЧФП используем аппарат обработки неравноточных измерений [20, п. 6.2.4].

ЧНФП $u_j^i(k_j)$ определяются в личных шкалах измерения экспертов, поэтому необходимо перейти к ЧФП $u^i(k_j, \bar{k}_j^-) = k^i V_j^i u_j^i(k_j)$, которые измеряются в единой шкале. Групповая ЧФП будет определяться в соответствии с выражением

$$u^{\Gamma(a)}(k_j, \bar{k}_j^-) = \sum_{i=1}^M u^i(k_j, \bar{k}_j^-) K^i, \quad (3)$$

где M — число экспертов.

При $k_j = k_j^+$ ЧНФП всех экспертов равны единице, в результате получим значения k^{Γ} и V_j^{Γ} :

$$k^{\Gamma(a)} = \sum_{j=1}^m u^{\Gamma(a)}(k_j^+, \bar{k}_j^-) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^M k^i V_j^i K^i, \quad (4)$$

$$V_j^{\Gamma(a)} = u^{\Gamma(a)}(k_j^+, \bar{k}_j^-) / k^{\Gamma(a)} = \sum_{i=1}^M k^i V_j^i K^i / k^{\Gamma(a)}. \quad (5)$$

Групповая ЧНФП будет определяться следующим образом:

$$u^{\Gamma(a)}(k_j) = u^{\Gamma(a)}(k_j, \bar{k}_j^-) / (k^{\Gamma(a)} V_j^{\Gamma(a)}). \quad (6)$$

При использовании приведенной процедуры (а) вычисления групповой ЧФП $u^{\Gamma(a)}(k_j, \bar{k}_j^-)$ в соответствии с (3) нарушается аксиома 4 относительной важности критериев, в то время как для каждого эксперта аксиома выполняется.

Поэтому предлагается вторая процедура (b) для вычисления групповой ЧФП $u^{\Gamma(b)}(k_j, \bar{k}_j^-)$. Представим функцию предпочтения через безразмерные критерии u_j (см. выражение (2)).

Выполнение аксиомы относительной важности критериев для (2) означает линейность ЧФП: $g(u_j, \mathbf{0}) = k V_j u_j$. Для всех экспертов выполняется линейность $g^i(u_j, \mathbf{0}) = k^i V_j^i u_j$. Значит, при их усреднении для групповой ЧФП

$$g^{\Gamma(b)}(u_j, \mathbf{0}) = \sum_{i=1}^M g^i(u_j, \mathbf{0}) K^i = u_j \sum_{i=1}^M k^i V_j^i K^i \quad (7)$$

тоже выполняется линейность.

При $u_j = 1$ получим $g^i(1, \mathbf{0}) = k^i V_j^i$, в результате выражение для $k^{\Gamma(b)} = \sum_{j=1}^m g^{\Gamma(b)}(1, \mathbf{0})$ будет совпадать с (4), т. е. $k^{\Gamma(b)} = k^{\Gamma(a)}$. Аналогично получим, что $V_j^{\Gamma(b)} = V_j^{\Gamma(a)}$ вычисляются в соответствии с формулой (5).

Отметим, что усреднение $g^i(u_j, \mathbf{0})$ проводится при равных значениях u_j . Поэтому усреднение личных ЧНФП экспертов тоже должно выполняться при равных значениях u_j . Для этого по каждому эксперту

определим обратную функцию $k_j^i(u_j) = u_j^{i-1}(u_j)$, затем усредним их:

$$k_j^{\Gamma(b)}(u_j) = \sum_{i=1}^M K^i k_j^i(u_j). \quad (8)$$

Взяв обратную функцию от $k_j^{\Gamma(b)}(u_j)$, получим групповую ЧНФП

$$u_j^{\Gamma(b)}(k_j) = k_j^{\Gamma(b)-1}(u_j).$$

На рис. 2 приведены групповые ЧНФП, рассчитанные для обеих процедур по личным ЧНФП четырех экспертов, приведенных на рис. 1. Так как на рис. 1 функции обезличены, поэтому при определении групповых ЧНФП компетентность экспертов была принята одинаковой. Как видим, $u_j^{\Gamma(a)}(k_j)$ и $u_j^{\Gamma(b)}(k_j)$ существенно отличаются.

В соответствии со сформулированными в п. 1 принципами формирования групповых предпочтений следует использовать вторую процедуру (b).

Перейдем к формированию ЧНФП для текстовых переменных. Пусть текстовый критерий k_j принимает n значений $k_{j,1}, k_{j,2}, \dots, k_{j,q}, \dots, k_{j,n}$. Согласование единой шкалы измерения сводится к определению минимального $k_{j,1}$ и максимального $k_{j,n}$ по предпочтению значений. Такое согласование проводится на предварительном этапе. Минимальное по предпочтению значение принимается за нуль $u_{j,1} = 0$, а максимальное — за единицу $u_{j,n} = 1$. Групповые значения текстовых значений определяются взвешиванием по компетентностям K^i личных оценок экспертов:

$$u_{j,q}^{\Gamma} = \sum_{i=1}^M K^i u_{j,q}^i.$$

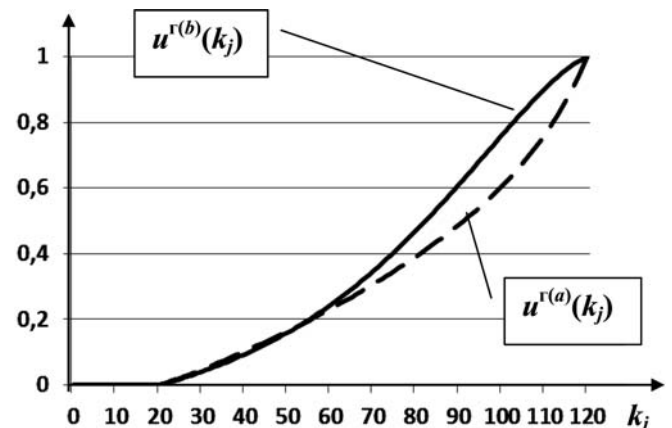


Рис. 2. Групповые ЧНФП, рассчитанные по процедурам а и б

3. Идентификация генерирующей функции коллективной функции предпочтений

Для идентификации $\psi(x)$ используются оценки предпочтения объектов $s = 1, 2, \dots, N$, в которых несколько значений u_j^s отличны от нуля. Именно такие оценки характеризуют совместное влияние частных критериев на ФП. Следует подчеркнуть, что $\psi(x)$ связывает безразмерные значения частных критериев. Многокритериальные объекты в задаче идентификации $\psi(x)$ следует представлять в виде вектора безразмерных величин $\mathbf{u}^s \equiv \{u_j^s\}$. Для всех экспертов оценки $g(\mathbf{u}^s)$ определены в единой шкале. Поэтому оценки многокритериальных объектов, данные всеми экспертами, можно рассматривать как единое множество Ω , которое определяет их коллективную генерирующую функцию.

По результатам опроса каждого эксперта может быть определена его функция предпочтения. Если в результате получаем, что для всех экспертов тип ФП (1) одинаков, то коллективная ФП тоже этого же типа.

Прежде чем переходить к вопросам формирования единого множества Ω оценок объектов, докажем следующее утверждение.

Утверждение 1. Для функции предпочтения типа

$g(\mathbf{u}) = \psi\left(\sum_{j=1}^m \psi^{-1}(kV_j u_j)\right)$ нелинейная функция равных значений безразмерных критериев (ФРЗБП)

$g(u) = \psi\left(\sum_{j=1}^m \psi^{-1}(kV_j u)\right)$ однозначно определяет ге-

нерирующую функцию $\psi(x)$.

Доказательство. Каждое значение ФРЗБП $g(u)$ связывает $m + 1$ точки $\psi(x)$: m точек определяются на основе $x_j = \psi^{-1}(kV_j u)$ и само значение $g(u)$

соответствует $g(u) = \psi\left(\sum_{j=1}^m x_j\right)$. Причем значение

функции $\psi(x)$ в точке $\sum_{j=1}^m x_j$ определяется меньши-

ми значениями $kV_j u$ в точках $x_j = \psi^{-1}(kV_j u)$. Получаем, что как для заданной ФРЗБП $g(u)$, так и для генерирующей функции $\psi(x)$ все последующие значения определяются предыдущими, т. е. функция $\psi(x)$ на начальном отрезке определяет ее на всем интервале $[0; 1]$. Значит, не может быть двух разных функций $\psi(x)$, которые приводят к одной нелинейной $g(u)$.

Для линейной ФРЗБП $g(u) = u$, должно выполняться

следующее соотношение: $\sum_{j=1}^m x_j = \sum_{j=1}^m \psi^{-1}(kV_j u) =$

$$= \psi^{-1}\left(u \sum_{j=1}^m kV_j\right) = \psi^{-1}(uk). \text{ Это справедливо для}$$

$\psi(x) = x^p$, причем при любом значении параметра p .

Учитывая утверждение 1, для идентификации коллективной ФП достаточно использовать только оценки экспертов ФРЗБП.

Оценки объектов в точках полного факторного эксперимента (ПФЭ) используются в статье [18] для проверки типа ФП. Следует обратить внимание, что на оценки объектов ПФЭ каждого эксперта влияют весовые коэффициенты этого эксперта. Но весовые коэффициенты экспертов уже были усреднены при определении групповых V_j^T . Если использовать оценки объектов ПФЭ, данные экспертами при идентификации групповой генерирующей функции, то информация о весах экспертов еще раз будет использоваться, но уже при идентификации $\psi(x)$.

Строго говоря, на личные экспертные оценки объектов на ФРЗБП весовые коэффициенты тоже влияют, но в меньшей степени. Это объясняется равенством безразмерных значений критериев в ФРЗБП. Тогда, например, в случае двух критериев веса могут быть разные $V_1 = 0,4$ и $V_2 = 0,6$, но у разных экспертов они могут меняться для критериев: у первого эксперта $V_1^1 = 0,4$, $V_2^1 = 0,6$, а у второго

эксперта $V_1^2 = 0,6$, $V_2^2 = 0,4$. Суммы $\sum_{j=1}^m \psi^{-1}(k^i V_j^i u)$

будут зависеть только от k^i . Следовательно, на личные оценки объектов на ФРЗБП в большей степени влияет масштабный коэффициент k^i и разброс весов, чем их значения. Еще меньшее влияние личные весовые коэффициенты экспертов оказывают на оценки объектов по линии равных значений аргументов (ЛРЗА) (о ЛРЗА подробнее см. [18]). Поэтому, если опрос по ним был проведен, их оценки следует включать в общее множество объектов для идентификации генерирующей функции.

Сформировав единое множество Ω оценок ФРЗБП и функции по ЛРЗА всех экспертов $R^i(u^{(s)})$ (каждый эксперт сделал n_i оценок), следует переходить к процедуре идентификации генерирующей функции. Процедура идентификации изложена в статье [18]. В качестве весовых коэффициентов используются полученные V_j^T и масштабный групповой коэффициент k^T . Условие для идентификации $\psi(x)$ учитывает компетентность экспертов:

$$\min S^2 = \min \sum_{i=1}^M K^i \sum_{s=1}^{n_i} (R^i(u^{(s)}) - g(u^{(s), i}))^2. \quad (9)$$

4. Оценка достоверности коллективной функции предпочтения

Получаемой в результате обработки личных экспертных данных КФП необходимо дать оценку достоверности, т. е. ответить на вопрос, насколько можно доверять КФП. Для этих целей можно использовать доверительные интервалы групповых оценок. Но надо сказать, что такая оценка основана только на рассеянии личных оценок экспертов, причем по каждому параметру отдельно.

В экспертных методах принято оценивать достоверность результатов экспертизы через согласованность экспертов, которая определяется как множественная корреляция всех экспертов по всем оценкам. Рассмотрим вопросы оценки согласованности экспертов в задаче формирования коллективной ФП.

Параметрами КФП являются дискретные и непрерывные величины. К дискретным параметрам относятся значения предпочтений текстовых критериев ($u_{j,q}^r$) и весовые коэффициенты (V_j^r), к непрерывным — групповые ЧНФП.

Для дискретных значений в качестве меры согласованности экспертов используется коэффициент множественной корреляции (коэффициент согласия), определяемый как среднее значение попарных коэффициентов корреляции экспертных данных:

$$E = \bar{R} = \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^M R_{i,l} / M^2. \quad (10)$$

Для $u(k_j^+, \bar{k}_j^-) = k^i V_j^i$ коэффициент корреляции между данными i и l экспертов равен $R_{i,l} = \text{cov}(k_j^i V_j^i, k_j^l V_j^l) / S(k_j^i V_j^i) S(k_j^l V_j^l)$. Отметим, что компетентность экспертов при определении коэффициента согласия не используется. Коэффициент E используется при числе экспертов от трех и более. Для двух экспертов используется обычный коэффициент корреляции.

Если критерий текстовый со значениями $k_1, k_2, \dots, k_q, \dots, k_{n-1}$, то корреляция равна $R(u_{j,q}^i, u_{j,q}^l) = \text{cov}(u_{j,q}^i, u_{j,q}^l) / S(u_{j,q}^i) S(u_{j,q}^l)$. Причем, так как у всех экспертов $k_{j,1}$ минимальное по предпочтению $u_{j,1} = 0$, а $k_{j,n}$ максимальное $u_{j,n} = 1$, то вычисленные $R_{i,l}$ следует проводить для $q = 2, 3, \dots, n-1$.

Вычисленное значение коэффициента согласия проверяется на значимость, т. е. проверяется гипотеза о независимости экспертных данных.

Особенностью многокритериальных задач является привлечение небольшого числа экспертов, так как опрос по выявлению их предпочтений довольно трудоемкая процедура. Число экспертов M обычно бывает в пределах 2...10. Число критериев m , для которых строится функция предпочтения, также небольшое 2...5, при большем числе критериев переходят к иерархической системе критериев. Поэтому особое значение приобретает проверка

гипотезы при малых выборках: небольшом числе критериев и экспертов.

Что касается дискретных экспертных данных, то для проверки значимости коэффициента согласия при малых выборках в большинстве литературных источников по экспертным методам [1, 2] имеются распределения для шкалы порядка (метода ранжирования). Если необходимо проверить значимость E для шкалы интервалов, как в нашей задаче, то переходят от непрерывных значений к рангам и проверяют гипотезу. Однако если у всех экспертов весовые коэффициенты имеют одинаковый порядок (такая ситуация часто встречается в многокритериальных задачах), коэффициент согласия получится равный единице и проверить его на значимость не удастся.

Поэтому для проверки значимости коэффициента E для шкал интервалов при малых выборках методом статистического моделирования были построены распределения E , приведенные в табл. 1. Чтобы воспользоваться им, необходимо рассчитать коэффициент согласия в соответствии с формулой (10), задаться уровнем α значимости для проверки гипотезы (ошибка второго рода — вероятность ошибки при отвержении гипотезы), например, $\alpha = 0,1$. По таблице распределения в соответствии с числом

Таблица 1

Распределения коэффициента согласия (E) при малых выборках для шкал интервалов, отношений

Число объектов оценки m	Число экспертов $M = 3$						
	$\alpha = 0,30$	$\alpha = 0,25$	$\alpha = 0,20$	$\alpha = 0,15$	$\alpha = 0,10$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
3	0,4498	0,5196	0,5976	0,6843	0,7798	0,8846	0,9763
4	0,4373	0,4832	0,5349	0,5946	0,6665	0,7616	0,8927
5	0,4256	0,4621	0,5032	0,5513	0,6102	0,6929	0,8231
6	0,4169	0,4481	0,4832	0,5244	0,5756	0,6487	0,7721
7	0,4100	0,4376	0,4689	0,5054	0,5512	0,6179	0,7328
8	0,4049	0,4301	0,4585	0,4916	0,5334	0,5945	0,7027
9	0,4006	0,4237	0,4497	0,4803	0,5190	0,5759	0,6778
10	0,3967	0,4183	0,4427	0,4713	0,5072	0,5606	0,6572
	Число экспертов $M = 4$						
3	0,3076	0,3545	0,4125	0,4855	0,5810	0,7150	0,8936
4	0,3166	0,3518	0,3928	0,4427	0,5069	0,6018	0,7609
5	0,3133	0,3421	0,3753	0,4154	0,4670	0,5445	0,6824
6	0,3092	0,3341	0,3627	0,3968	0,4409	0,5074	0,6298
7	0,3056	0,3278	0,3532	0,3837	0,4229	0,4820	0,5925
8	0,3023	0,3225	0,3456	0,3732	0,4088	0,4624	0,5635
9	0,2996	0,3183	0,3395	0,3649	0,3977	0,4472	0,5410
10	0,2973	0,3147	0,3345	0,3582	0,3885	0,4344	0,5221
	Число экспертов $M = 5$						
3	0,2537	0,2876	0,3272	0,3775	0,4529	0,5748	0,7848
4	0,2517	0,2794	0,3119	0,3522	0,4062	0,4904	0,6474
5	0,2489	0,2724	0,2997	0,3330	0,3768	0,4447	0,5738
6	0,2462	0,2666	0,2904	0,3190	0,3565	0,4145	0,5265
7	0,2438	0,2621	0,2833	0,3088	0,3422	0,3934	0,4934
8	0,2415	0,2583	0,2775	0,3006	0,3308	0,3772	0,4678
9	0,2395	0,2549	0,2728	0,2941	0,3218	0,3645	0,4480
10	0,2377	0,2521	0,2686	0,2885	0,3142	0,3538	0,4315

экспертов M , числом критериев m (или n значений текстовых критериев) и выбранным α определить значение $E_{\text{табл}}$. Решающим правилом для отвержения гипотезы является неравенство $E_{\text{расч}} \geq E_{\text{табл}}$. Выполнение этого неравенства означает, что согласованность экспертов достаточна и групповые дискретные значения достоверны при заданном α .

При числе экспертов 6 и более распределение статистики $M(m-1)E$ стремится к распределению Пирсона χ^2 с числом степеней $\nu = m - 1$ (доказательство можно посмотреть в [2, стр. 67]).

Для числовых критериев ЧНФП определяются непрерывными функциями. В [21, п. 15.3] рассматриваются характеристики случайных функций $X(t)$. Кроме дисперсии используются корреляционные функции $K_x(t_1, t_2)$, определяющие корреляцию значений при фиксированных значениях переменной t_1 и t_2 . В задаче определения групповой ЧНФП фиксированными значениями является множество безразмерных значений критерия (u_j, q) . Среднее значение попарных корреляционных функций экспертных ЧНФП для фиксированного множества u_j, q определяет коэффициент согласия экспертов ЧНФП по данному критерию.

Чтобы получать оценки экспертов в единой шкале характеристики ЧНФП (интервал $[k_{\min}; k_{\max}]$, функции возрастающая, убывающая или немонотонная) всех экспертов согласовываются на предварительном этапе. Это означает, что у всех экспертов функции возрастающие или убывающие, т. е. значения коэффициента согласия будут заведомо близки к единице. Поэтому оценивать согласованность ЧНФП экспертов коэффициентом множественной корреляции не правомерно.

Предлагается оценивать согласованность ЧНФП экспертов по максимальному на интервале $u \in [0; 1]$ среднеквадратичному отклонению $k_j^i(u) = u_j^{i-1}(u)$ (напомним, что $k_j^i(u)$ используется в формуле (8) при определении групповой ЧНФП):

$$S_j = \frac{1}{\text{abs}(k_j^+ - k_j^-)} \max_{u_j} S_j(u_j), \quad (11)$$

где $S_j(u_j) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (k_j^i(u_j) - \bar{k}_j^i(u_j))^2}$, а $\bar{k}_j^i(u_j) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M k_j^i(u_j)$.

Аргументом функции $S_j(u_j)$ являются безразмерные значения критерия (рис. 3). Множитель $\frac{1}{\text{abs}(k_j^+ - k_j^-)}$ в (11) введен для того, чтобы статистика S_j была инвариантна к единицам измерения критериев.

Для проверки гипотезы H_0 о случайности совпадения экспертных ЧНФП методом статистического моделирования было построено распределение S_j (табл. 2) при числе экспертов $M = 2, 3, \dots, 10$ (наиболее распространенные случаи). Для заданного уровня значимости α в соответствии с числом экспертов M необходимо определить значение S_j табл. Решающим правилом для отвержения гипотезы является неравенство $S_j \text{ расч} \leq S_j \text{ табл}$. Выполнение этого неравенства означает, что согласованность экспертов достаточна и групповая ЧНФП достоверна для заданного α .

Для четырех ЧНФП, приведенных на рис. 1, была построена функция $S_j(u_j)$, которая приведена на рис. 3.

Максимальное значение $S_j \text{ расч}$ равно 0,206. Для $M = 4$ в табл. 2 найдем ближайшее большее значение $S_j \text{ табл} = 0,2179$, оно соответствует уровню значимости $\alpha = 0,15$. Это означает, что согласованность ЧНФП можно считать достаточной только при уровне значимости 0,15 и более, а для $\alpha = 0,1$ гипотеза о случайности функций не может быть отвергнута.

Очевидно, что при увеличении M распределение S_j стремится к дискретному значению, соответствующему дисперсии равномерного распределения, равному $S = \sqrt{1/12} = 0,2889$. Это видно из

Таблица 2
Распределение максимального среднеквадратического отклонения частных нормированных функций предпочтения (S_j) при малом числе экспертов

Число экспертов	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,10$	$\alpha = 0,15$	$\alpha = 0,20$	$\alpha = 0,25$	$\alpha = 0,30$	$\alpha = 0,50$
2	0,0685	0,1111	0,1411	0,1646	0,1852	0,2043	0,2230	0,2975
3	0,1127	0,1550	0,1818	0,2019	0,2192	0,2349	0,2496	0,3005
4	0,1364	0,1754	0,1999	0,2179	0,2330	0,2465	0,2589	0,3003
5	0,1520	0,1886	0,2111	0,2274	0,2407	0,2524	0,2631	0,3002
6	0,1628	0,1976	0,2184	0,2332	0,2453	0,2557	0,2651	0,2972
7	0,1713	0,2046	0,2240	0,2376	0,2485	0,2578	0,2663	0,2939
8	0,1785	0,2101	0,2283	0,2408	0,2508	0,2594	0,2670	0,2905
9	0,1845	0,2146	0,2317	0,2433	0,2526	0,2605	0,2676	0,2893
10	0,1892	0,2183	0,2345	0,2454	0,2541	0,2615	0,2681	0,2889

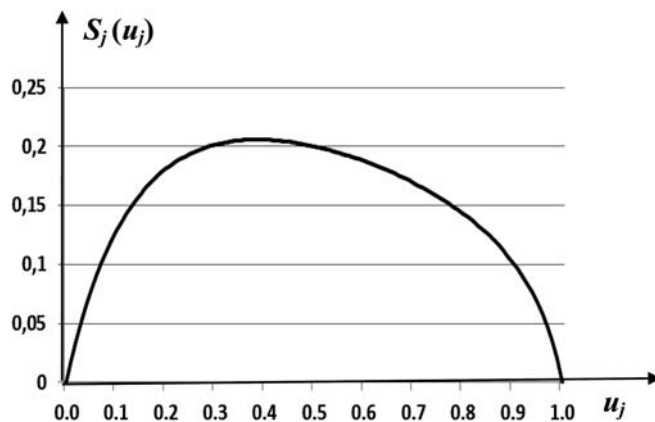


Рис. 3. Пример функции $S_j(u_j)$

табл. 2 распределений — разница S_j , соответствующих $\alpha = 0,30$ и $\alpha = 0,01$, уменьшается при возрастании M , а медиана (ей соответствует $\alpha = 0,50$), практически неизменна и стремится к 0,2889.

Остановимся на вопросе оценки достоверности полученной групповой генерирующей функции $\psi^r(x)$. Экспертные оценки $R^i(u^{(s)})$, являющиеся результатами измерения предпочтений объектов, можно рассматривать как случайные величины, распределенные по нормальному закону.

На основе оценок каждого эксперта $R^i(u^{(s)})$ ($i = 1, 2, \dots, M$) определяем генерирующую функцию и приведенную остаточную разность $S^i =$

$$= \frac{1}{n_i - 1} \sum_{s=1}^{n_i} (R^i(u^{(s)}) - g^i(u^{(s)}))^2.$$

Число степеней свободы равно $n_i - 1$, так как при идентификации ге-

нерирующей функции $\psi^i(\lambda, x)$ определяется ее параметр λ . Следует сказать, что именно S^i определяет итоговое различие между оценками эксперта и его функцией предпочтения. Чем меньше S^i , тем более точно предпочтения этого эксперта описываются ФП, значит, более точны параметры его ФП. Поэтому в качестве характеристики компетентности эксперта K^i , при формировании групповой ФП, можно использовать $1/S^i$. Напомним, что полученные K^i должны быть отнормированы, чтобы $\sum_{i=1}^M K^i = 1$.

После расчета S^i определим среднюю остаточную разность $\bar{S} = \sum_{i=1}^M S^i / M$. В результате идентификации групповой генерирующей функции определяется остаточная разность $S^r =$

$$= \frac{1}{\sum_{i=1}^M n_i - 1} \sum_{i=1}^M K^i \sum_{s=1}^{n_i} (R^i(u^{(s)}) - g^r(u^{(i, s)}))^2.$$

О согласованности экспертов по генерирующей функции можно судить, сравнивая S^r и \bar{S} . Вместе с тем, нельзя проверить гипотезу о равенстве $S^r = \bar{S}$, используя распределение Фишера (отношение дисперсий) [20, п. 6.3.3], как это делается в регрессионном анализе. Из формул S^r и S^i видно, что это не дисперсии.

Заключение

Задача формирования коллективных предпочтений включает построение групповых частных функций предпочтения и идентификацию групповой генерирующей функции.

Для групповой ЧФП должны выполняться те же аксиомы предпочтения, что и для каждого эксперта. Чтобы обеспечить это условие необходимо усреднить обратные ЧНФП.

Групповая генерирующая функция определяется не усреднением, а ее идентификацией на объединенном по всем экспертам множестве оценок функций равных значений безразмерных критериев.

Оценка достоверности групповых весовых коэффициентов проводится, как в экспертных методах, на основе коэффициента согласия. Построены распределения для проверки значимости коэффициентов согласия для шкал интервалов и отношений при малых выборках, которые используются при оценке достоверности дискретных параметров функции предпочтения. Для оценки согласованности непрерывных ЧНФП экспертов предложена статистика — максимальное среднеквадратичное отклонение на интервале ее определения. Построено распределение этой статистики при малых выборках.

Список литературы

1. **Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г.** Математико-статистические методы экспертных оценок. М.: Статистика, 1980. 263 с.
2. **Елгаренко Е. А., Крупинова Е. К.** Обработка экспертных оценок. М.: МИФИ, 1983. 94 с.
3. **Литвак Б. Г.** Экспертная информация. Методы получения и анализа. М.: Радио и связь, 1982. 184 с.
4. **Brans J. P., Vincke Ph.** A preference ranking organization method: the PROMETHEE method // Management science. 1985. Vol. 31. P. 647—656.
5. **Pastun M., Leysen J.** Construction an outranking relation with ORESTE // Math. Comput. modeling. 1989. Vol. 12. N 10—11. P. 1255—1268.
6. **Roy B.** The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. University de Paris-Dauphine, 1990. 25 p. URL: <http://www.lamsade.dauphine.fr/~mousseau/pmwiki-2.1.5/uploads/Research/Roy91.pdf>
7. **Opricovich S., Tzeng, G. H.** Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS // European Journal Operation Research. 2004. Vol. 156. N 2. P. 445—455.
8. **Саати Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
9. **Саати Т. Л.** Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети: Пер. с англ. М.: Изд-во ЛКИ. 2008. 360 с.
10. **Kahraman C.** Fuzzy multi-criteria decision making: theory and applications with recent developments. New York: Springer, 2008. 591 p.
11. **Lee H.-S.** Optimal consensus of fuzzy opinions under group decision making environment // Fuzzy Sets and Systems. 2002. Vol. 132, N 3. P. 303—315.
12. **Hwang C. L., Lin M. L.** Group Decision Making under Multiple Criteria: Methods and Applications. Berlin: Springer Verlag, 1987.
13. **Herrera F., Herrera-Viedma E., Verdegay J. L.** Rational Consensus Model in Group Decision Making Using Linguistic Assessments // Fuzzy Sets and Systems. 1997. Vol. 88, N 1. P. 31—49.
14. **Ларичев О. И.** Вербальный анализ решений / Под ред. А. Б. Петровского. М.: Наука, 2006. 181 с.
15. **Ларичев О. И., Мошкович Е. М.** Качественные методы принятия решений. М.: Физматлит, 1996. 208 с.
16. **Петровский А. Б., Ройзензон Г. В.** Многокритериальный выбор с уменьшением размерности пространства признаков: многоэтапная технология ПАКС // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 4. С. 88—103.
17. **Кини Р. Л., Райфа Х.** Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.
18. **Елгаренко Е. А.** Описание предпочтений в многокритериальных задачах с иерархической системой критериев // Информационные технологии. 2013. № 2. С. 2—10.
19. **Пфанцаль И.** Теория измерений: Пер. с англ. М.: Мир, 1976. 248 с.
20. **Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В.** Курс теории вероятностей и математической статистики. М.: Наука, 1969. 512 с.
21. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей: учебник для вузов. 6-е изд. стер. М.: Высшая школа, 1999. 576 с.

С. А. Субботин, кан. техн. наук, доц., проф. каф.,
e-mail: subbotin@zntu.edu.ua,
Запорожский национальный
технический университет, Украина

Выделение обучающих выборок для построения диагностических моделей на основе методов вычислительного интеллекта

Решена задача автоматизации формирования обучающих выборок для построения диагностических моделей по прецедентам. Впервые предложен метод формирования обучающих выборок, основанный на отображении исходной выборки на одномерную ось и обеспечивающий сохранение в сформированной подвыборке важнейших для последующего анализа топологических свойств исходной выборки.

Ключевые слова: выборка, экземпляр, диагностика, распознавание

Введение

Для автоматизации принятия решений в задачах технической и биомедицинской диагностики, автоматической классификации образов необходимо иметь модель принятия решений. На практике зачастую в виду отсутствия или ограниченности экспертных знаний диагностические и распознающие модели приходится строить с помощью методов вычислительного интеллекта (нейронных и нейронечетких сетей, деревьев решений, иммунных систем и т. п.) на основе набора наблюдений (прецедентов), который может иметь достаточно большой объем. Это, в свою очередь, приводит к необходимости использования ЭВМ с большим объемом оперативной памяти, а также существенно увеличивает затраты машинного времени на обработку данных.

Поэтому актуальной задачей является сокращение объема выборок данных. Как правило, это реализуется посредством извлечения случайных подвыборок из исходной выборки [1–4], что может приводить к формированию нерепрезентативных в топологическом смысле выборок вследствие не включения в них редко встречающихся экземпляров на границах классов, представленных в исходной выборке.

В работах [5–10] предложены переборные и эволюционные методы формирования выборок, а также модель (комплекс критериев) качества выборки, которые позволяют обеспечить формирование из исходной выборки подвыборки меньшего объема, имеющих в системе используемых критериев наи-

лучшие свойства. Однако для выборок очень большого объема применение данных методов и модели оказывается весьма затратным как с вычислительной точки зрения, так и с точки зрения ресурсов оперативной и дисковой памяти.

Цель данной работы — создание метода автоматического извлечения обучающих выборок из исходных выборок большого объема.

1. Постановка задачи

Пусть мы имеем исходную выборку $X = \langle x, y \rangle$ — набор S прецедентов о зависимости $y(x)$, $x = \{x^s\}$, $y = \{y^s\}$, $s = 1, 2, \dots, S$, характеризующихся набором N входных признаков $\{x_j\}$, $j = 1, 2, \dots, N$, где j — номер признака, и выходным признаком y . Каждый s -й прецедент представим как $\langle x^s, y^s \rangle$, $x^s = \{x_j^s\}$, где x_j^s — значение j -го входного признака, а y^s — значение выходного признака для s -го прецедента (экземпляра) выборки, $y^s \in \{1, 2, \dots, K\}$, где K — число классов, $K > 1$.

Тогда задача сокращения объема выборки может быть представлена как задача формирования (выделения) из исходной выборки $X = \langle x, y \rangle$ подвыборки X^* , $X^* \subset X$, меньшего объема $S^* < S$, обладающей наиболее важными свойствами исходной выборки.

Поскольку для задач автоматизации поддержки принятия диагностических решений, а также задач автоматической классификации наиболее важным является сохранение топологии классов, то формируемая подвыборка должна обеспечивать сохранение экземпляров исходной выборки, находящихся на границах классов.

2. Метод выделения обучающих выборок

Для обнаружения экземпляров, находящихся на границах классов, в общем случае необходимо решить задачу кластер-анализа, что требует определения расстояний между всеми экземплярами выборки. Это, в свою очередь, требует либо загрузки всей выборки в память ЭВМ (что не всегда возможно ввиду ограниченного объема оперативной памяти), либо многократных проходов по исходной выборке (что вызывает значительные затраты машинного времени), а также приводит к необходимости хранить и обрабатывать матрицу расстояний между экземплярами большой размерности. Поэтому в процессе формирования выборок целесообразно сократить их размерности, что предлагается достигнуть путем отображения экземпляров их исходного N -мерного пространства признаков в одномерное пространство обобщенного признака. При этом отображение выборки необходимо осуществить таким образом, чтобы сохранить по возможности топологию классов. Обеспечив учет топо-

гии классов при преобразовании на обобщенную ось, мы сможем реализовать выделение экземпляров, находящихся на границах классов, путем просмотра упорядоченной выборки по координате на обобщенной оси и нахождения смежных по координате на обобщенной оси экземпляров, принадлежащих к разным классам. Это позволит исключить необходимость расчета расстояний между экземплярами, а также высокоитеративный поиск при реализации кластер-анализа.

Предлагаемый метод формирования выборок предусматривает выполнение следующих этапов.

Этап инициализации. Задать исходную выборку $\langle x, y \rangle$. Для каждого j -го признака ($j = 1, 2, \dots, N$) определить граничные минимальное и максимальное значения x_j^{\min} и x_j^{\max} , соответственно. Если они не известны априорно из постановки задачи, то для этого выполнить просмотр всей исходной выборки. Затем определить число интервалов значений признаков для формирования разбиения признакового пространства на прямоугольные блоки-кластеры k_j .

Очевидно необходимо, чтобы $k_j \geq 2$, $k_j \ll S$, а также желательно, чтобы $\sum_{j=1}^N k_j < NS$.

Общее число формируемых прямоугольных блоков составит $\prod_{j=1}^N k_j$. Для упрощения вычислений можно сделать все k_j равными. Тогда число формируемых блоков составит $(k_j)^N$. В этом случае необходимо обеспечить, чтобы $(k_j)^N < S$, т. е. $k_j < \sqrt[N]{S}$.

Например, число интервалов можно определить по формуле

$$k_j = \begin{cases} K, & K > \text{round}(\ln S), K < \sqrt[N]{S}; \\ \max\{2, \text{round}(\sqrt[N]{S})\}, & K > \text{round}(\ln S), K > \sqrt[N]{S}; \\ \max\{2, \text{round}(\ln S)\}, & K < \text{round}(\ln S) < \sqrt[N]{S}; \\ K, & \text{round}(\ln S) \leq K, K < \sqrt[N]{S}; \\ \max\{2, \text{round}(\sqrt[N]{S})\}, & \text{round}(\ln S) \leq K, K \geq \sqrt[N]{S}. \end{cases}$$

Определив число интервалов, найдем их длины

$$\theta_j = \frac{x_j^{\max} - x_j^{\min}}{k_j}.$$

Этап формирования разбиения пространства признаков. Установить число экземпляров q -го класса, попавших в k -й интервал j -го признака $S_{j,k}^q = 0$.

Для каждого s -го экземпляра выборки, $s = 1, 2, \dots, S$ необходимо:

— определить его координаты в системе номеров интервалов признаков для $j = 1, 2, \dots, N$:

$$\hat{x}_j^s = \begin{cases} \text{round}\left(1 + \frac{x_j^s - x_j^{\min}}{\theta_j}\right), & \theta_j > 0; \\ 1, & \theta_j = 0; \end{cases}$$

— увеличить число экземпляров y^s -го класса, попавших в k -й интервал j -го признака: $S_{j,k}^{y^s} = S_{j,k}^{y^s} + 1$.

Этап анализа интервалов и признаков. Для каждого k -го интервала каждого j -го признака, $k = 1, 2, \dots, k_j$; $j = 1, 2, \dots, N$, следует:

— подсчитать общее число экземпляров всех классов, которые в него попали:

$$S_{j,k} = \sum_{q=1}^K S_{j,k}^q;$$

— определить веса для номеров интервалов признаков:

$$w_{j,k} = \begin{cases} \frac{\max_{q=1,2,\dots,K} \{S_{j,k}^q\}}{S_{j,k}}, & S_{j,k} > 0; \\ 0, & S_{j,k} = 0. \end{cases}$$

Интервал значений признака будет тем ценнее при принятии решений, чем больше будет в нем доля экземпляров только одного класса.

Для каждого j -го признака, $j = 1, 2, \dots, N$, определить его вес:

$$w_j = \frac{1}{k_j} \sum_{k=1}^{k_j} w_{j,k} \text{ либо } w_j = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^{k_j} w_{j,k} S_{j,k}$$

Признак будет тем ценнее, чем больше будет доля интервалов, содержащих экземпляры преимущественно одного класса.

Для набора признаков на основе полученных значений весов определить ранги признаков $\{r_j\}$, где r_j — ранг признака x_j (начиная с 1 и заканчивая N в порядке невозрастания значения веса признака).

Этап отображения экземпляров из многомерного пространства на одномерную ось — обобщенный признак I может быть реализован одним из способов, предложенных ниже в разд. 3. В результате выполнения данного этапа получим выборку $\langle I^s, y^s, s \rangle$, где I^s — координата s -го экземпляра по обобщенной оси.

Этап анализа экземпляров на обобщенной оси. Отсортировать экземпляры $\langle I^s, y^s, s \rangle$ по обобщенной оси I , после чего, двигаясь слева направо, для s -го экземпляра обобщенной оси необходимо:

— если s -й экземпляр является крайним слева или крайним справа, то занести его в обучающую выборку:

$$X^p = X^p \cup \{\langle I^s, y^s, s \rangle \mid \forall p = 1, 2, \dots, S, p \neq s : I^s \leq I^p\};$$

— если номера классов текущего s -го и предыдущего g -го экземпляров не совпадают, то занести текущий и предыдущий экземпляры в обучающую выборку, если они и одинаковые с ними экземпляры там отсутствуют:

$$X' = X' \cup \{ \langle I^s, y^s, s \rangle \mid \neg \exists p = 1, 2, \dots, S : \langle I^s, y^s, p \rangle \in X', I^s \leq I^s, y^s \neq y^s \},$$

$$X' = X' \cup \{ \langle I^g, y^g, g \rangle \mid \neg \exists p = 1, 2, \dots, S : \langle I^g, y^g, p \rangle \in X', I^g \leq I^s, y^g \neq y^s \}.$$

Этап формирования обучающей выборки. Просматривая исходную выборку X , занести в формируемую обучающую выборку X^* те экземпляры из X , номера которых содержатся в X' :

$$\forall s = 1, 2, \dots, S : X^* = X^* \cup \{ \langle x^s, y^s \rangle \mid s \in X' \}.$$

Из экземпляров X , не вошедших в X^* , при необходимости можно сформировать тестовую выборку.

Предложенный метод позволяет автоматизировать выделение из исходной выборки обучающей и тестовой подвыборки, обеспечивая включение в обучающую выборку наиболее значимых для построения модели экземпляров. При этом также в качестве побочного результата определяются оценки индивидуальной информативности признаков и их интервалов значений, которые могут быть использованы для решения задач отбора признаков, формирования и редукции нечетких термов и правил.

3. Отображение экземпляров на обобщенную ось

Для отображения экземпляров из исходного многомерного пространства признаков на одномерную обобщенную ось предлагается использовать один из следующих способов.

Способ 1. Для каждого номера интервала j -го признака получим его бинарное представление (бинарные числа, дополненные нулями слева до c_j — числа цифр в k_j). Установим: координату s -го экземпляра по обобщенной оси $I^s = 0$, номер разряда координаты по обобщенной оси $p = 1$. Двигаясь в цикле по номерам признаков j в порядке убывания их рангов и по группе цифр в номере интервала $c = 1, 2, \dots, c_j$; если $p \leq d$, где d — число разрядов в бинарной разрядной сетке ЭВМ, то записать в p -й разряд (при нумерации слева) бинарного представления обобщенного признака I^s c -й разряд (при нумерации слева) номера интервала, в который попал s -й экземпляр по j -му признаку \hat{x}_j^s , и принять $p = p + 1$. В результате получим координату экземпляра по обобщенной оси с неявным ранжированием и отбором признаков.

Способ 2. Этот способ представляет собой альтернативный способ 1 формат построения обобщенного признака. Если суммарное число бит для

представления номеров интервалов всех признаков $c_j k_j N$ не превышает числа разрядов в бинарной разрядной сетке d , при равном числе c_j для всех признаков для каждого номера интервала j -го признака получим его бинарное представление (бинарные числа, дополненные нулями слева до c_j — числа цифр в k_j), установим: координату s -го экземпляра по обобщенной оси $I^s = 0$, номер разряда координаты по обобщенной оси $p = 1$; двигаясь в цикле по группе цифр в номере интервала $c = 1, 2, \dots, c_j$ и по номерам признаков j в порядке убывания их рангов записать в p -й разряд (при нумерации слева) бинарного представления обобщенного признака I^s c -й разряд (при нумерации слева) номера интервала, в который попал s -й экземпляр по j -му признаку, и принять $p = p + 1$. В результате получим координату по обобщенной оси с неявным ранжированием признаков.

Способ 3. Обобщенный признак формируется на основе хэширования с сохранением локальности (*locality-preserving hashing*) [11]. Исходное пространство разбивается на 2^k равных гиперкубов, каждый из которых идентифицируется ключом I^s длиной k бит, где k — число разбиений признаков. После i -го разбиения исходное пространство разбивается на 2^i N -мерных куба, при этом i -е разбиение осуществляется по j -й размерности: $j = i \bmod N$. На i -м разбиении, если гиперкуб попадает в верхнюю половину разбиваемого диапазона, то i -й бит его ключа устанавливается равным единице, а в противном случае — нулю (устанавливается равным единице бит в i -й позиции k битового идентификатора, дополненного нулями слева, если длина меньше k). Алгоритмически ключ I^s формируется следующим образом: вначале установить: $I^s = 0$, $x_j^{\min'} = x_j^{\min}$, $x_j^{\max'} = x_j^{\max}$, после чего для $i = 1, 2, \dots, k$ выполнять: установить $j = i \bmod N$, $x_j^{\text{mid}} = (x_j^{\min'} + x_j^{\max'}) / 2$, $I^s = 2I^s$; если $x_j^s > x_j^{\text{mid}}$, тогда установить: $x_j^{\min'} = x_j^{\text{mid}}$, $I^s = I^s + 1$, в противном случае установить: $x_j^{\max'} = x_j^{\text{mid}}$.

Способ 4. Приведенные выше способы обеспечат преобразование на дискретную обобщенную ось. Если суммарное число бит для представления номеров интервалов всех признаков превышает число разрядов в бинарной разрядной сетке ЭВМ, то возможно использовать преобразования на вещественную обобщенную ось с частичной потерей информации: суммировать в вещественную координату по обобщенному признаку I^s c -й разряд

(при нумерации слева) номера интервала, в который попал s -й экземпляр по j -му признаку:

$$I^s = \sum_{j=1}^N \frac{w_j \hat{x}_j^s}{r_j k_j}.$$

Способ 5. Определим расстояние от s -го экземпляра до единичного вектора в нормированной системе координат:

$$d^s = \sqrt{\sum_{j=1}^N (\hat{x}_j^s - 1)^2},$$

а также угол между экземпляром как вектором и единичным вектором:

$$\varphi^s = \arccos \left(\frac{\sum_{j=1}^N \hat{x}_j^s}{\sqrt{N \sum_{j=1}^N (\hat{x}_j^s)^2}} \right).$$

Таким образом мы отобразим s -й экземпляр из N -мерного в двумерное пространство. Далее для координат s -го экземпляра в сформированном двумерном пространстве по аналогии с первым способом получим координату s -го экземпляра по обобщенной оси I^s .

Способ 6. Сгенерируем Q опорных векторов — центров псевдокластеров $C^q = \{C_j^q\}$, $q = 1, 2, \dots, Q$, $K \leq Q \ll S$, $j = 1, 2, \dots, N$. В простейшем случае их координаты можно задать случайным образом с учетом размерности и масштаба признаков ($x_j^{\min} \leq C_j^q \leq x_j^{\max}$), либо, установив $Q = K$, определить для каждого класса его центр:

$$C_j^q = \frac{1}{S^q} \sum_{s=1}^N \{x_j^s | y^s = q\}, j = 1, 2, \dots, N, q = 1, 2, \dots, K.$$

Далее рассчитаем номера кластеров с учетом их близости и положения в пространстве признаков относительно наименьших значений признаков следующим образом:

- найдем расстояния от центров кластеров до точки с наименьшими значениями признаков

$$R_{\min}(C^q) = \sum_{j=1}^N (C_j^q - x_j^{\min})^2;$$

- найдем расстояния между центрами кластеров

$$R(C^q, C^p) = \sum_{j=1}^N (C_j^q - C_j^p)^2;$$

- найдем центр кластера, ближайший к точке с наименьшими значениями признаков,

$$q = \arg \min_{q=1,2,\dots,Q} \{R_{\min}(C^q)\};$$

- примем данный центр в качестве текущего, установим новый номер текущего кластера $t = 1$, занесем текущий кластер во множество центров с новым индексом ($C^* = C^* \cup C^{*1}$, $C^{*1} = C^q$) и удалим его из множества центров без нового индекса ($C = C/C^q$);
- пока существует хотя бы один кластер без нового индекса (т. е. $C \neq \emptyset$) выполнять: среди оставшихся кластеров без нового индекса в C найти ближайший кластер к текущему:

$$p = \arg \min_{\substack{g=1,2,\dots,Q \\ C^g \in C}} \{R(C^q, C^g)\},$$

- увеличить $t = t + 1$, занести текущий кластер во множество центров с новым индексом ($C^* = C^* \cup C^{*t}$, $C^{*t} = C^p$) и удалить его из множества центров без нового индекса ($C = C/C^p$).

В результате получим C^* — набор центров кластеров с номерами, соответствующими их близости к точке с наименьшими значениями признаков, а также позволяющими определять качественно близость центров кластеров между собой.

Далее для каждого экземпляра исходной выборки x^s , $s = 1, \dots, S$:

- определим расстояния от него до каждого центра кластера

$$R(x^s, C^{*q}) = \sum_{j=1}^N (x_j^s - C_j^{*q})^2;$$

- найдем индекс ближайшего центра кластера

$$p = \arg \min_{q=1,2,\dots,Q} \{R(x^s, C^q)\};$$

- найдем угол между векторами x^s и C^p относительно точки с наименьшими значениями признаков

$$\varphi = \frac{\sum_{j=1}^N (x_j^s - x_j^{\min})(C_j^p - x_j^{\min})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (x_j^s - x_j^{\min})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^N (C_j^p - x_j^{\min})^2}},$$

- после чего присвоим s -му экземпляру координату на обобщенной оси

$$I^s = p + \frac{\varphi}{\pi}.$$

4. Эксперименты и результаты

Для экспериментальной проверки работоспособности предложенного метода была разработана его программная реализация, с помощью которой проводили эксперименты по сокращению объема выборки данных для ряда практических задач [12, 13], характеристики которых приведены в таблице.

Результаты проведенных экспериментов подтвердили работоспособность и практическую приме-

Характеристики исходных и сформированных выборок

Задача	K	N	S	S^*/S
Диагностирование патологий плода по кардиофонограмме [12]	3	23	2126	0,11
Предсказание типа лесного пожара [13]	7	54	581012	0,09

нимость предложенного метода, а также программного обеспечения, реализующего его. Как видно из таблицы, использование предложенного метода позволяет существенно сократить объем выборки (в 9—11 раз), не требуя при этом загрузки в память ЭВМ исходной выборки, а также многочисленных проходов по исходной выборке, что существенно снижает требования к ресурсам ЭВМ, обеспечивая при этом сохранение в сформированной подвыборке важнейших для последующего анализа топологических свойств исходной выборки.

Заключение

В работе решена актуальная задача автоматизации формирования обучающих выборок для построения диагностических моделей по прецедентам.

Научная новизна результатов работы заключается в том, что впервые предложен метод формирования обучающих выборок, который обеспечивает сохранение в сформированной подвыборке важнейших для последующего анализа топологических свойств исходной выборки, не требуя при этом загрузки в память ЭВМ исходной выборки, а также многочисленных проходов по исходной выборке, что позволяет существенно сократить объем выборки и снижает требования к ресурсам ЭВМ.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что разработано программное обеспечение, реализующее предложенный метод формирования и редукции выборок, а также проведены эксперименты по их исследованию при решении практических задач, результаты которых позволяют рекомендовать разработанный метод для использования на практике при решении задач интеллектуального анализа данных.

Дальнейшие исследования могут быть сосредоточены на разработке новых способов формирования описаний экземпляров в виде обобщенных показателей, а также разработке реализаций предло-

женного метода для параллельных вычислительных систем и распределенной обработки данных.

Работа выполнена в Запорожском национальном техническом университете в рамках научно-исследовательской темы "Интеллектуальные информационные технологии автоматизации проектирования, моделирования, управления и диагностирования производственных процессов и систем" (№ гос. регистрации 0112U005350).

Список литературы

1. **Chaudhuri A., Stenger H.** Survey sampling theory and methods. New York: Chapman & Hall, 2005. 416 p.
2. **Encyclopedia of survey research methods** / ed. P. J. Lavrakas. Thousand Oaks: Sage Publications, 2008. Vol. 1—2. 968 p.
3. **Кокрен У.** Методы выборочного исследования / пер. с англ. И. М. Сониной; под ред. А. Г. Волкова, Н. К. Дружинина. М.: Статистика, 1976. 440 с.
4. **Субботин С. А.** Формирование выборок и анализ качества моделей на основе нейронных и нейро-нечетких сетей в задачах диагностики и распознавания образов. Saarbrücken: LAP Lambert academic publishing, 2012. 232 с.
5. **Интеллектуальные информационные технологии проектирования автоматизированных систем диагностирования и распознавания образов** / С. А. Субботин, Ан. А. Олейник, Е. А. Гофман, С. А. Зайцев, Ал. А. Олейник; под ред. С. А. Субботина. Харьков: Компания Смит, 2012. 317 с.
6. **Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей** / А. В. Богуслаев, Ал. А. Олейник, Ан. А. Олейник, Д. В. Павленко, С. А. Субботин; под ред. Д. В. Павленко, С. А. Субботина. Запорожье: Мотор Сич, 2009. 468 с.
7. **Subbotin S. A.** The training set quality measures for neural network learning // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2010. Vol. 19, N 2. P. 126—139.
8. **Субботин С. А.** Комплекс характеристик и критериев сравнения обучающих выборок для решения задач диагностики и распознавания образов // *Математичні машини і системи*. 2010. № 1. С. 25—39.
9. **Субботин С. А.** Критерии индивидуальной информативности и методы отбора экземпляров для построения диагностических и распознающих моделей // *Біоніка інтелекту*. 2010. № 1. С. 38—42.
10. **Субботин С. А.** Методы формирования выборок для построения диагностических моделей по прецедентам // *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*: зб. наук. праць. Харків: НТУ "ХПІ", 2011. № 17. С. 149—156.
11. **Yang X., Hu Y.** A scalable index architecture for supporting multi-dimensional range queries in peer-to-peer networks // *Collaborative computing: networking, applications and worksharing : International conference, Atlanta, 17—20 November 2006 : proceedings*. Los Alamitos: IEEE, 2006. P. 1—10.
12. **Cardiotocography Data Set** [Electronic resource]. URL: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Cardiotocography>.
13. **Coverttype Data Set** [Electronic resource]. URL: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Coverttype>.

В. И. Струченков, д-р техн. наук, проф.,
e-mail: str1942@mail.ru,

Московский государственный
технический университет радиотехники,
электроники и автоматики (МГТУ МИРЭА)

О различных подходах к автоматизации проектирования трасс линейных сооружений

Рассматриваются различные подходы к созданию компьютерных программ, проектирующих трассы линейных сооружений. Указываются недостатки интерактивного проектирования с заданием проектных решений проектировщиком и использованием компьютера для решения вспомогательных задач. Критически анализируется локальное варьирование параметров трассы. Рекомендуются комплексный подход с решением проектных задач во взаимной увязке и САПР с обратными связями, в которой компьютер проектирует продольные профили по вариантам плана трассы.

Ключевые слова: трасса, план и продольный профиль, нелинейное программирование, целевая функция, градиент

Введение

К настоящему времени сложилось как минимум два подхода к использованию компьютеров в САПР линейных сооружений. Еще с 60-х годов прошлого века в развитых странах Запада стали разрабатывать системы, в которых все проектные решения задавались проектировщиком, а компьютер использовался для решения вспомогательных расчетно-графических задач и изготовления проектной документации. Этот подход является определяющим и в современных зарубежных САПР [1, 2], и в их российских аналогах [3, 4].

Работы по автоматизации проектирования трасс линейных сооружений в нашей стране были начаты примерно в те же годы [5]. При отсутствии технических возможностей организации интерактивного проектирования и выдачи проектной документации в виде чертежей эти работы с самого начала были сориентированы на формализацию проектных задач в математических моделях и разработку алгоритмов выработки проектных решений с применением методов оптимизации.

Были решены не только расчетные задачи, но и некоторые задачи оптимизации: оптимальное распределение земляных масс [6] и проектирование оптимального продольного профиля железных и автомобильных дорог [7, 8].

В то время снижение затрат труда и средств в строительстве за счет повышения качества проек-

тов было актуальным, и соответствующая система "Профиль" в плановом порядке использовалась проектными институтами Мосгипротранс, Ленгипротранс и Сибгипротранс. Несмотря на крайне ограниченные возможности ЭВМ БЭСМ-4 только по вариантам трассы БАМ в 70-х годах с применением этой системы было запроектировано более 1200 км продольного профиля. Было установлено, что применение методов нелинейного программирования для решения этой задачи дает существенный экономический эффект за счет снижения объемов земляных работ и стоимости строительства [7].

В 80-х годах прошлого века широкое практическое применение получила система "Профиль 2А" для проектирования новых автодорог и ее аналог система "Профиль 2Р" для проектирования реконструкции автодорог [8].

В дальнейшем была разработана программа оптимизации трассы на участках напряженного хода [9] на основе нелинейного программирования. Ее применение при проектировании реальных объектов показало, что экономический эффект от совместного проектирования плана и профиля на порядок выше, чем при проектировании продольного профиля по заданному варианту плана трассы.

В 90-х годах исследования в данном направлении были прекращены. Программа совместного проектирования плана и профиля на напряженных ходах, разработанная для ЕС ЭВМ, была утрачена, как и целый ряд других интересных программ этого направления.

В современных САПР главенствующим направлением является интерактивное проектирование, однако в последние годы автору удалось воссоздать алгоритмы и написать новые программы для решения ряда проектных задач на современных компьютерах с применением математически корректных алгоритмов оптимизации. Появились и новые разработки ряда проектирующих эвристических программ.

В силу высокой стоимости строительства линейных сооружений, особенно железных и автомобильных дорог в условиях пересеченного рельефа, разработка САПР с применением компьютерной выработки проектных решений на основе алгоритмов оптимизации продолжает оставаться актуальной.

Рассмотрение особенностей различных подходов, идей и методов компьютерного проектирования трасс линейных сооружений является целью настоящей статьи.

Содержательная постановка задачи

Трасса — это гладкая трехмерная кривая, состоящая из элементов заданного вида и удовлетворяющая целому ряду ограничений.

Традиционно трасса представляется в виде двух плоских кривых: план и продольный профиль.

План — это проекция трассы на координатную плоскость XOY , а *продольный профиль* — это зависимость аппликаты Z от длины дуги в плане. Задача проектирования оптимальной трассы превращается в две взаимосвязанные задачи: проектирование плана и проектирование продольного профиля.

На положение трассы влияют рельеф земли, геологические, гидрологические, климатические и другие условия.

Оптимальному варианту трассы должен соответствовать минимум взвешенной суммы затрат на строительство и последующую эксплуатацию дороги. Таким образом, трасса — это экстремаль некоторого функционала, а задача поиска оптимальной трассы может рассматриваться как задача вариационного исчисления.

Требования к трассе железной дороги включают следующее:

в плане: элементами плана трассы являются отрезки прямых и окружностей, сопрягаемые клотоидами. При этом длины элементов должны быть не менее заданных значений, радиусы кривых и параметры клотоид тоже ограничены. Соответствующие ограничения на план трассы выражаются нелинейными неравенствами относительно переменных, определяющих план;

в продольном профиле: элементы продольного профиля прямые, так что проектная линия — ломаная, на элементы которой также накладываются ограничения.

В проектировании трасс других линейных сооружений в качестве элементов используются, кроме упомянутых, дуги окружностей и парабол.

Особенности задачи проектирования оптимальных трасс

Основная особенность рассматриваемой задачи применительно практически к любому из линейных сооружений — это чрезвычайная сложность ее формализации, т. е. построения математической модели и тем самым сведения проектной задачи к математической задаче оптимизации. Дело в том, что реально приходится рассматривать целый комплекс взаимосвязанных проектных задач. Так, применительно к проектированию дорог во взаимосвязи с проектированием плана и продольного профиля должны решаться следующие задачи:

- проектирование поперечных профилей земляного полотна;
- проектирование водопропускных и других искусственных сооружений;
- распределение земляных масс;
- выбор способов производства земляных работ и др.

Формализовать все это в единой математической модели крайне сложно. Практически каждая из упомянутых проектных задач в свою очередь является задачей оптимизации.

Еще одна из особенностей рассматриваемой задачи состоит в том, что число элементов плана и

продольного профиля неизвестно. Так, продольный профиль новой железной дороги проектируется в виде ломаной, звенья которой должны удовлетворять ограничениям по минимальной длине, уклонам и разностям уклонов смежных элементов. Но число этих элементов неизвестно, равно как и число элементов плана трассы. Получается задача оптимизации неизвестной размерности. Такие задачи не вписываются в одно из наиболее общих направлений современной теории оптимизации — нелинейное программирование.

Необходимо отметить также и взаимосвязь элементов трассы, которая в общем случае не позволяет разбить проектируемый объект на отдельные локальные участки и проектировать их независимо друг от друга. При проектировании трасс новых железных дорог объектом проектирования является железнодорожный перегон (25...30 км и более). При проектировании автодорог в условиях пересеченного рельефа также приходится рассматривать участки значительной протяженности.

Наконец, отметим и наличие не формализуемых факторов, например, оценка экологических и социальных последствий строительства.

Не приспособлена к формализации задачи и нормативная база. Так, в строительных нормах и правилах содержатся нормы проектирования для обычных, сложных и особо сложных условий, а сами эти понятия не определены.

В силу отмеченных трудностей и по ряду других причин для поиска оптимальной трассы как пространственной кривой пока не созданы приемлемые для практических целей математические модели и алгоритмы проектирования.

В связи с этим в качестве первого шага была решена задача проектирования продольного профиля по заданному варианту плана трассы.

Эта задача существенно проще, так как фиксируется сразу несколько составляющих строительных и эксплуатационных затрат, появляется возможность формализовать задачу в математических моделях и построить итерационный процесс совместного решения взаимосвязанных проектных задач:

- проектирование продольного профиля;
- проектирование поперечных профилей земляного полотна;
- проектирование водопропускных и других искусственных сооружений;
- распределение земляных масс;
- выбор способов производства работ.

Задание вариантов плана трассы остается за проектировщиком, как и анализ компьютерных проектных решений и принятие окончательного решения.

Задача проектирования продольного профиля имеет и самостоятельное значение, так как в ряде случаев, особенно в обжитых районах, положение трассы в плане определяется условиями землепользования.

Математическая модель задачи проектирования продольного профиля

Если обозначить профиль земли $H(s)$, где s — текущая длина в плане, а проектную линию $Z(s)$, то задача состоит в следующем. По заданному $H(s)$ найти такую линию $Z(s)$, чтобы она удовлетворяла всем ограничениям и достигался минимум

$$\min \int_0^{S_0} F(Z(s), H(s), s) ds, \quad (1)$$

где S_0 — длина трассы в плане, а функция F моделирует строительные затраты на элементе длины.

Реальные модели должны учитывать конструкции поперечных профилей земляного полотна, наличие водопропускных и других искусственных сооружений, распределение земляных масс и способы производства земляных работ и др.

Задача вариационного исчисления (1) сводится к задаче нелинейного программирования, обладающей интересными особенностями независимо от конкретного вида функции F .

Поскольку число элементов искомой линии известно, то на первом этапе приходится считать, что переломы профиля земли и проектной линии (т. е. профиля трассы) имеют одни и те же абсциссы. Профиль земли всегда представлен в виде ломаной с неравномерным шагом, и такое допущение позволяет фиксировать число элементов n (размерность задачи) и длины s_j элементов (в плане). При этом получится ломаная с большим, чем нужно, числом элементов, но ее отклонения от окончательной $Z(s)$ из-за многочисленных ограничений невелики [7]. Идея в том, чтобы найти эту ломаную путем решения задачи оптимизации, затем преобразовать ее в линию с элементами, длины которых не менее допустимых, определив тем самым реальную размерность задачи и начальное приближение, и на последнем этапе выполнить оптимизацию при всех ограничениях и необходимых уточнениях целевой функции. Такой многоэтапный процесс с уточнением математической модели и ее параметров является обычным для решения сложных проектных задач творческого характера.

Зная число и длины элементов искомой ломаной, можно аналитически выразить все ограничения на $Z(s)$, если принять в качестве неизвестных z_i ($i = 1, 2, \dots, n$) ординаты ее вершин. Эти ограничения делятся на три группы.

- на ординаты в отдельных точках $z_i \leq z_i^{\max}$ или $z_i \geq z_i^{\min}$;
- на уклоны элементов профиля

$$a_i \leq (z_{i+1} - z_i)/s_i \leq b_i, \quad i = 1, 2, \dots, n - 1.$$

Здесь s_j — длины элементов. Эти ограничения являются дискретным аналогом ограничения на первую производную;

- на разности уклонов смежных элементов:

$$c_i \leq (z_{i+2} - z_{i+1})/s_{i+1} - (z_{i+1} - z_i)/s_i \leq d_i.$$

Эти ограничения являются дискретным аналогом ограничения на кривизну. В силу малости проектных уклонов длина элемента и его проекции практически совпадают.

Структура системы ограничений использована при разработке алгоритма оптимизации.

Если задача решается на минимум объемов земляных работ, то подынтегральная функция в (1) — это площадь поперечного сечения земляного полотна, которая зависит от поперечного профиля земли и конструкции проектного поперечного профиля.

Поскольку в целевой функции (1) $Z(s)$ и $H(s)$ представлены ломаными с совпадающими абсциссами вершин, то можно выразить аналитически объемы земляных работ при заданных конструкциях поперечных профилей земляного полотна [10, 11]. В общем случае для реальных поперечных профилей земли и конструкций проектных поперечных профилей мы получаем кусочно-квадратические зависимости площади F_i от рабочей отметки по оси h_i , определяемой выражением

$$h_i = z_i - H_i. \quad (2)$$

Объем земляных работ вычисляется через площади по формулам численного интегрирования (в программе — по формуле трапеций).

На i -м элементе объем

$$V_i = (F_i(h_i) + F_{i+1}(h_{i+1}))s_i/2.$$

Следовательно, для $i = 2, \dots, n - 1$

$$\frac{\partial V}{\partial h_i} = \frac{\partial F_i}{\partial h_i} (s_{i-1} + s_i)/2. \quad (3)$$

Формулы (2) и (3) позволяют вычислить градиент целевой функции.

Если целевая функция соответствует строительным затратам, то грунты выемок подразделяются на четыре вида в соответствии с возможностями их использования для сооружения насыпей:

- непригодные;
- обыкновенные;
- дренирующие нескальные;
- скальные.

Площади и объемы вычисляются для каждого вида грунтов отдельно.

Дополнительно для грунтов каждого вида задаются затраты в расчете на 1 м^3 :

- q_1 — на сооружение насыпи из выемки;
- q_2 — на сооружение насыпи из грунта карьеров (резервов);
- q_3 — разработки непригодного или излишнего грунта выемок в отвал.

Эти данные могут различаться на разных участках проектируемого перегона. Затраты на сооружение земляного полотна K вычисляются через объемы

насыпей v_f и выемок v_c в зависимости от соотношения объемов:

$$\begin{aligned} \text{если } v_f > v_c, \text{ то } K &= q_1 v_c + q_2 (v_f - v_c) = \\ &= q_2 v_f + (q_1 - q_2) v_c; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{если } v_f \leq v_c, \text{ то } K &= q_1 v_f + q_3 (v_c - v_f) = \\ &= (q_1 - q_3) v_f + q_3 v_c. \end{aligned}$$

Наличие непригодного грунта учитывается отдельно.

Характерно, что коэффициенты при v_f , v_c (приведенные единичные стоимости) меняются от итерации к итерации, если меняется соотношение объемов. Поэтому на каждой итерации вычисляются соответствующие площади и объемы в целом по участку, на котором насыпи и выемки сооружаются совместно, затем определяются приведенные единичные стоимости для грунтов каждого вида и далее градиент целевой функции. Таким образом, учитывается взаимосвязь положения проектной линии в насыпях и выемках, сооружаемых совместно.

В строительную стоимость включаются и затраты на искусственные сооружения, для чего задаются зависимости их стоимостей от рабочих отметок. Эти зависимости уточняются в процессе проектирования, так же как и типы искусственных сооружений.

Алгоритм оптимизации

Итерационный процесс поиска оптимума состоит из следующих шагов:

1. Построение допустимого начального приближения z^0 .
2. Вычисление градиента целевой функции f^0 .
3. Определение множества активных ограничений (активного набора).
4. Построение направления спуска p^0 в граничном линейном многообразии.
5. Проверка условий прекращения счета и, если они выполнены, то окончание процесса, иначе следующий шаг.
6. Вычисление шага λ , новой итерационной точки $z^{k+1} = z^k + \lambda p^k$ и переход к п. 2.

Если в качестве направления спуска используется проекция p антиградиента $-f$, то стандартный алгоритм для ее вычисления требует на каждой итерации решать систему линейных уравнений. Так, по формуле Розена [12]

$$p = -(E - A^T(AA^T)^{-1}A)f. \quad (4)$$

Здесь E — единичная матрица, A — матрица активных на данной итерации ограничений, а верхний индекс T означает транспонирование. При большой размерности задачи это приводит к неприемлемым затратам машинного времени.

Наличие структурных особенностей системы ограничений позволяет при любой комбинации активных ограничений построить базис в соответствующей граничной плоскости и определить направление спуска вообще без решения каких-либо систем

линейных уравнений. На этом основан новый алгоритм приведенного градиента [10, 11].

Полученная в результате оптимизации проектная линия не удовлетворяет ограничениям по минимальной длине элемента.

Ее преобразование к окончательному виду выполняется с использованием алгоритма динамического программирования [13]. Целевая функция при этом соответствует объемам земляных работ.

Полученная в результате линия нужна только как начальное приближение. И все проведенные расчеты были нужны только для установления числа элементов (размерность задачи) и начального приближения для последнего этапа оптимизации с использованием алгоритма нелинейного программирования.

Если продольный профиль проектируется для сравнения вариантов плана трассы, то это сравнение может выполняться с использованием промежуточных результатов в целях выявления неконкурентных вариантов.

Для получения окончательного варианта проектной линии проводится еще один этап расчетов. На этом этапе при проектировании железных дорог новыми переменными являются отметки переломов проектной линии, через которые, в силу линейности элементов, легко вычисляются отметки во всех точках перелома профиля земли (старые переменные). Новых переменных примерно на порядок меньше, чем старых. Практически используются те же программы оптимизации, добавлен только пересчет производных целевой функции по новым переменным через производные по старым переменным.

При проектировании автодорог учитывается наличие вертикальных кривых.

Компьютерное проектирование продольного профиля выполняется в целях минимизации строительных затрат, а варианты плана трассы сравниваются по приведенным строительно-эксплуатационным затратам. Дело в том, что при проектировании продольного профиля практически не изменяется длина трассы, и изменение эксплуатационных затрат при вариациях проектной линии, полученной из условия минимума строительной стоимости, не дает значимого снижения приведенных затрат.

Характерно, что при размерности задачи до 1000 переменных и до 4000 ограничений требуется не более чем 5000 итераций, т. е. рассматриваются не миллионы, а в худшем случае только тысячи вариантов. На каждой итерации получается допустимое решение с меньшим значением целевой функции. Алгоритм обеспечивает достижение окрестности точки минимума без рассмотрения всех допустимых вариантов.

Плюсы и минусы интерактивного проектирования

Если при проектировании трасс в сложных условиях пересеченного рельефа все проектные решения задаются проектировщиком на основе его опыта и

интуиции, то возникает вопрос о близости этих решений к оптимуму, о возможности их улучшения за счет оптимизации. Другими словами, достаточно ли опыта и интуиции проектировщика, если ставить целью снижение затрат на строительство и последующую эксплуатацию сооружения?

Для ответа на этот вопрос уместно вспомнить об уникальном эксперименте, который еще в 1975—1976 гг. организовал и осуществил Ю. С. Карих [14].

Целью эксперимента было выяснить, насколько могут различаться проектные решения различных проектировщиков при проектировании продольного профиля автодорог, если каждому из них независимо предоставить одну и ту же информацию и поставить одну и ту же задачу.

Эксперимент проводился в два этапа.

На первом этапе был выбран участок продольного профиля протяженностью 5 км по трассе автомобильной дороги, проходящей в пересеченной местности с перепадом отметок 54 м. Предлагалось запроектировать продольный профиль по нормам третьей технической категории.

В эксперименте участвовали 14 проектировщиков из различных организаций со стажем работы от 8 до 38 лет. Исходные данные и количественные результаты эксперимента приведены в работе [14].

Характерно, что в некоторых точках профиля расхождения по полученным вариантам проектной линии превышали 8 м, отклонения по стоимости достигали 35 %, а в объемах земляных работ 40 % [14].

На втором этапе продольный профиль того же участка с теми же исходными данными, но вычерченный в обратном направлении (конечная точка стала началом, а начальная конечной) через год был предложен тем же специалистам. Расхождения между полученными вариантами были примерно такими же. Характерно, что расхождения между вариантами одного и того же специалиста в одних и тех же точках при проектировании в различных направлениях достигали 2 м.

Конечно, возможность визуализации и выработки проектных решений в интерактивном режиме с использованием современных компьютеров способствует повышению качества проектирования. Но ограниченные размеры экрана, необходимость корректировки отдельных участков без учета их взаимосвязи с соседними участками создают дополнительные сложности.

Интерактивное проектирование легко вписалось в традиционную "линейную" технологию, при которой полученный на основе интуиции и опыта вариант является основой для решения последующих проектных задач другими специалистами, которые проектируют земляное полотно, искусственные сооружения, распределяют земляные массы и т. д. Возврат к проектированию профиля возникает только при сложностях в решении этих задач, например, при малой высоте насыпи, которая не позволяет разместить водопропускную трубу большого диаметра.

Трудно представить, чтобы проектную линию меняли по экономическим соображениям, например, при изменениях числа и расположения карьеров в результате длительных согласований с собственниками земли. Да и при наличии этой информации у проектировщика нет данных: как и насколько менять проектную линию. Если же эксплуатируется проектирующая система, то достаточно изменить несколько чисел во входных данных и продолжить расчет.

Интерактивное проектирование не обеспечивает оптимальных решений даже в таких задачах, которые сводятся к получению линии, удовлетворяющей техническим ограничениям и максимально близкой к заданной. Такова задача выправки пути по данным съемки. Созданы многочисленные программы, при эксплуатации которых проектировщик задает границы круговых кривых, а компьютер выдает их параметры из условия наилучшего среднеквадратического приближения к имеющейся кривой. Обычно эта кривая является графиком кривизны (или углограммой), построенной по точкам съемки.

В сопоставлении с программой решения этой же задачи по методу нелинейного программирования установлено, что интерактивное проектирование с использованием различных программ для локального подбора элементов плана трассы дает результат, который может быть улучшен на 10...15 %. Это достигается потому, что проектирующая программа рассматривает трассу как единое целое.

Необходимо отметить, что научиться интерактивному проектированию проще, чем освоить проектирующую систему. Это хорошо известный факт: интеллектуальная система требует интеллектуального пользователя.

Необходимость оптимизации проектных решений по таким сложным и дорогостоящим сооружениям, как железные и автомобильные дороги, не должна вызывать сомнений. Интуиции и опыта проектировщиков для этой цели явно недостаточно. Будущее за проектирующими системами и технологиями с обратными связями, обеспечивающими решение целого комплекса проектных задач во взаимной увязке.

О других методах компьютерного проектирования трасс

В некоторых работах утверждается, что для поиска оптимальной трассы с использованием быстрого действия современных компьютеров достаточно рассмотреть большое число вариантов. Так, в работе [15] сообщается, что "Система Trimble Quantm определяет расходы и просчитывает миллионы возможных маршрутов в соответствии с заданными ограничениями, чтобы выбрать и представить на рассмотрение проектировщика от 10 до 50 наилучших вариантов". Очевидно, под маршрутами в работе [15] понимаются варианты положения трассы

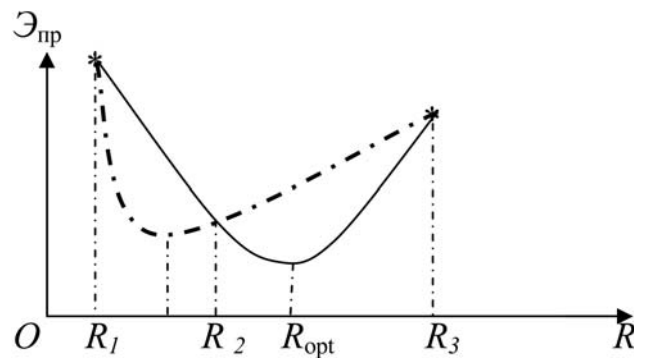
в плане. Поскольку в [15] не упоминается проектирование продольного профиля по каждому маршруту (где, в свою очередь, есть множество вариантов) можно понять, что решается известная "плоская" задача трассирования, в которой область поиска разбивается на элементы, и в каждом из них задаются затраты на строительство дороги в расчете на единицу длины. Такая задача имеет смысл для проектирования дорог только в условиях равнинного рельефа с осложненной геологией и наличием контурных ограничений в виде запрещенных зон или при проектировании сооружений, для которых проектная линия продольного профиля очевидна, например, при сооружении траншей фиксированной глубины при малых продольных уклонах профиля земли. Эта задача была решена еще в 70-х годах прошлого века с применением динамического программирования [16].

Что касается решения этой задачи перебором миллионов возможных вариантов, то решающее значение имеет способ назначения этих вариантов. Очевидно, это должен делать компьютер, но полный перебор вариантов невозможен даже на мощных современных компьютерах. В реальных проектных задачах миллион рассмотренных вариантов составляет ничтожную часть от общего числа возможных вариантов. Достаточно вспомнить о "проклятии размерности", которое не позволяет использовать не только полный перебор или случайный поиск, но и динамическое программирование даже при проектировании продольного профиля дороги при заданном плане трассы, если область поиска имеет ширину 10 м и более, а дискрет по вертикали 0,01 м. Именно поэтому приходится использовать комбинацию методов нелинейного и динамического программирования.

Не приводит к успеху и локальный подход, т. е. поочередное варьирование отдельных элементов трассы в силу отмеченной выше их взаимосвязи.

Так, в работе [17] рекомендуется: "Для выбора оптимального радиуса кривой R в трудных топографических условиях следует протрассировать три варианта при разных радиусах, определить строительную стоимость и эксплуатационные расходы участка дороги между общими точками и подсчитать для всех вариантов приведенные строительно-эксплуатационные расходы $\mathcal{E}_{пр}$. Построив график зависимости $\mathcal{E}_{пр}(R)$, можно найти оптимальный радиус, соответствующий минимуму показателя $\mathcal{E}_{пр}$ ". В работе [17] приводится рисунок, к которому мы добавили только штрих-пунктирную линию, построенную для радиусов R_1, R_2, R_3 .

Возникает вопрос, а какую кривую надо строить по трем точкам? Таких кривых бесконечно много. И почему должен быть минимум, а, например, не максимум на рассматриваемом интервале? Вообще, при увеличении радиуса приведенные затраты не обязательно уменьшаются, и все три точки могут соответствовать увеличению приведенных затрат при увеличении радиуса. Не случайно именно в слож-



Определение "оптимального" радиуса

ных условиях используются минимально допустимые радиусы кривых в плане.

Далее, как выделить этот локальный участок с единственным варьируемым параметром? Даже если проектируется обход отдельного изолированного препятствия, то если меняется радиус, то почему не меняется угол поворота и его вершина или длины переходных кривых (клотоид) слева и справа? Наконец, при изменении радиуса меняется продольный профиль. О том, как проектировать продольный профиль на компьютере в работе [17] не сообщается.

Рассмотренная рекомендация могла иметь смысл в докомпьютерную эпоху. А сейчас, если мы можем рассмотреть и обсчитать три варианта, то почему только три, а не много больше, и выбрать лучший вариант без построения каких-либо графиков?

Дело не в числе вариантов, а в бесперспективности самой идеи локального варьирования элементами трассы, особенно в сложных условиях, из-за их взаимосвязи. Достоинно сожаления, что рекомендации типа только что цитированной рекомендации из работы [17] по определению оптимального радиуса кривой в плане попадают в учебники для студентов транспортных вузов.

Различного рода эвристические алгоритмы предлагались и для проектирования плана и продольного профиля реконструируемых железных дорог.

Специфика рассматриваемых проектных задач такова, что в сложных условиях близость к оптимуму технически допустимого проектного решения не поддается количественной оценке, так как оптимальное решение неизвестно. Поэтому при использовании эвристических алгоритмов, обеспечивающих выполнение всех технических ограничений, остается открытым вопрос, можно ли улучшить полученный результат и насколько? Теоретически решить этот вопрос не всегда удается, тем более, что соответствующие подробные алгоритмы, как правило, не публикуются.

Характерны в этом отношении разработки компании Real Geo Project [18]. Так, для проектирования продольного профиля реконструируемых железных дорог разработана программа KORWIN, в которой "использован развитый математический аппарат. Для размещения переломов профиля ис-

пользуется вариантный подход на основе метода неявного (частичного перебора)" [18].

Отметим, что при проектировании реальных объектов полный перебор возможных положений переломов профиля (по абсциссам и ординатам) в этой задаче практически невозможен даже на современных компьютерах. Если варианты размещения переломов задаются вручную, то это все то же интерактивное проектирование и развитый математический аппарат здесь ни при чем. Если же размещение переломов задается компьютером, то принципиально важно, какие именно варианты исключаются из полного перебора. Может оказаться, что в одних условиях это не приводит к негативным последствиям, а в других условиях программа не сможет найти оптимальный вариант.

Идея отбраковки части допустимых вариантов реализована в таких математических методах, как динамическое программирование, метод ветвей и границ, и комбинированных методах [19]. Но там эта отбраковка математически обоснована.

Интересна и программа AQUILA для расчета параметров элементов плана железнодорожного пути при его реконструкции [18]. В ней также реализован проектирующий алгоритм, но "при больших сдвигах по ходу расчета выводятся сообщения о промежуточных результатах, и пользователю предлагается решить, продолжать автоматический расчет или перейти к интерактивному режиму работы. В интерактивном режиме можно быстро решить практически любую проектную задачу, однако в автоматическом режиме ЭВМ иногда находит нестандартные и очень эффективные решения" [18]. Из этой цитаты можно понять, что, начиная расчет, пользователь не знает, дойдет ли он до конца или придется решать задачу самому, при этом причины неприемлемых результатов останутся неизвестными. Математически корректный алгоритм в этой задаче должен дать оптимальное решение или сообщить об отсутствии допустимого решения вообще. Эффективные решения в пределах заданных пользователем норм и ограничений математически корректный алгоритм находит не иногда, а всегда. Эффективность работы такого алгоритма в сравнении с проектированием вручную или с эвристическими алгоритмами зависит от сложности задачи, многочисленности ограничений на искомое решение.

Заключение

В итоге можно сделать следующие выводы.

- ♦ До разработки математических моделей трехмерной задачи трассирования следует оставить назначение вариантов плана трассы проектировщику, лучше группе проектировщиков, так как каждый независимо от других может предложить свой вариант.
- ♦ Проектирование трасс даже при наличии проектирующих программ останется интерактивным,

так как полная формализация и автоматическое решение этой задачи пока недостижимы. Однако наличие систем, в которых компьютер при выработке проектных решений может не только решать примитивные задачи типа показать точку пересечения двух прямых или вписать кривую в угол, но и проектные задачи творческого характера, является несомненным достижением.

- ♦ Невостребованность подобных систем применительно к проектированию дорог объясняется крайне низкими объемами их строительства в нашей стране (особенно железных дорог), отсутствием потребителя, заинтересованного в повышении качества проектов, снижения сметной стоимости строительства.
- ♦ Такое положение дел не может продолжаться бесконечно. Проектирующие системы рано или поздно найдут свое практическое применение, как 30...40 лет тому назад нашли применение их примитивные (по современным меркам) прототипы.

Список литературы

1. Bentley Rail Track. URL: <http://www.bentley.com/>
2. CARD/1. URL: <http://www.card-1.com/en/home/>
3. Курилко Ю., Чешева В. Geonics ЖЕЛДОР — САПР // CADmaster. 2007. N 1 (36).
4. Topomatic Robur. URL: <http://www.topomatic.ru>.
5. Михалевич В. С., Шор Н. З. Математические основы решения задачи выбора оптимального очертания продольного профиля // Тр. Всесоюзного НИИ транспортного строительства. 1964. Вып. 51.
6. Нефёдов П. П., Лопухов А. Е. Современный способ решения задачи распределения земляных масс // Транспортное строительство. 1964. № 4.
7. Использование математических методов оптимизации и ЭВМ при проектировании продольного профиля железных дорог // Тр. Всесоюзного НИИ транспортного строительства. М.: Транспорт, 1977. Вып. 101.
8. Струченков В. И., Карих Ю. С., Шварц П. С. Математические методы оптимизации в системе автоматизированного проектирования дорог // Автомобильные дороги. 1980. № 12.
9. Струченков В. И., Шейдвассер Д. М. Оптимизация на ЭВМ трассы новой железной дороги на напряженных ходах // Транспортное строительство. 1987. № 3.
10. Struchenkov V. I. Mathematical Models and Optimization in Line Structure Routing: Survey and Advanced Results // International Journal Communication, Network and System Sciences. Special Issue: Models and Algorithms for Application. 2012. N 5.
11. Струченков В. И. Математические модели и методы оптимизации в системах проектировании трасс новых железных дорог // Информационные технологии. 2013. № 7.
12. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация: Пер. с англ. М.: Мир, 1985.
13. Струченков В. И., Козлов А. Н., Егунов А. С. Динамическое программирование в проектировании трасс линейных сооружений // Информационные технологии. 2011. № 8.
14. Карих Ю. С. Оценка существующих методов проектирования продольного профиля // Тр. ГипродорНИИ № 17. Повышение экономической эффективности капиталовложений в строительство, ремонт и содержание автомобильных дорог. М.: Изд. ГипродорНИИ, 1976.
15. Пархолуп С. Система проектирования транспортных магистралей Trimble Quantm //САПР и графика. 2013. № 3.
16. Вентцель Е. С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. 2-е изд. М.: Наука, 1988.
17. Кантор И. И. Изыскания и проектирование железных дорог. М.: Академкнига, 2003.
18. Бучкин В. Программы разработки компании Real Geo Project // САПР и графика. 2008. № 9.
19. Struchenkov V. I. Combined Algorithms of Optimal Resource Allocation // Applied Mathematics. 2012. N 3.

Е. А. Юлюгин, студент,
 Г. С. Речистов, мл. науч. сотр.,
 А. Л. Плоткин, д-р техн. наук,
 руководитель университетской программы,
 Московский физико-технический институт
 (государственный университет),
 e-mail: yulyugin@gmail.com

Моделирование нагрузки на сетевое оборудование. Изучение влияния топологии сети на производительность приложений молекулярной динамики

Рассматривается аналитически-симуляционный метод изучения влияния топологии сети на производительность приложений молекулярной динамики. Описанная методика представляет собой симуляцию работы приложения с проведением серии экспериментов для проверки точности результатов. Подход применялся и проверялся на приложении молекулярной динамики Gromacs.

Ключевые слова: Simics, производительность сети, трассировка, кластер, Wireshark, моделирование

Введение

В современных высокопроизводительных системах для научных вычислений имеются несколько уровней параллелизма. Например, в кластерных системах множество вычислительных узлов одновременно работают над различными частями одной и той же программы. При этом каждый из них может содержать несколько процессоров, а каждый процессор может иметь несколько ядер. Дальнейшее распараллеливание возможно и внутри ядра.

В данной работе рассматривается уровень параллелизма между отдельными вычислительными узлами, проводится анализ различных топологий сети и делаются выводы об их эффективности.

Исследование было проведено в целях определения, какая из существующих сетевых топологий наиболее эффективна для создания многомашинных вычислительных систем. Конечная цель — достижение максимальной производительности при фиксированном количестве оборудования.

В работе предложена модель сетевого коммутатора и способы оценки его производительности; рассмотрены различные стратегии выбора маршрута между двумя узлами сети и описан способ моделирования сетевого взаимодействия; приведе-

ны результаты проверки корректности модели и измерения средней пропускной способности на приложении молекулярной динамики.

Обзор литературы

Существует ряд работ [1–3], посвященных возможности определения производительности через аналитическое описание для имеющихся и разрабатываемых многопроцессорных систем.

В работе [1] доказывается, что при заданном объеме аппаратного обеспечения нет более эффективной сети, чем утолщенное дерево (англ. *fat-tree*). Однако в ней рассматривается преимущественно теоретический подход, тогда как мы описываем практический способ моделирования сложных компьютерных систем и измерения их сетевой активности.

В работе [2] рассматривается модель массового обслуживания (англ. *queueing network model*); вводятся метрики измерения производительности для этой модели и некоторые фундаментальные соотношения между ними. Результаты этой работы используются в нашем исследовании.

Существуют программные реализации сетевых симуляторов, например NS-3 [3]. Он находится в открытом доступе для исследования и обучения, распространяется под лицензией GNU GPL. Этот симулятор написан на языке программирования C, который требует предварительной компиляции. В нашем исследовании был избран другой подход — симулятор реализован на языке Python 2.7 [4], который является интерпретируемым и не требует предварительной компиляции. Симулятор, написанный для исследования, предложенного в этой статье, как и NS-3, основан на дискретной модели событий, описание которой можно найти в работе [5].

Перейдем к рассмотрению инструмента, используемого в нашем исследовании.

Описание созданного инструмента

Избранный подход представляет собой комбинацию симуляции многомашинной системы с помощью Wind River® Simics [6] со сбором трассы событий с последующим ее анализом с помощью инструмента, написанного на языке Python [4] и предназначенного для моделирования поведения сетевых маршрутизаторов.

Модель сетевого коммутатора. В предлагаемой модели сетевой коммутатор (англ. *switch* — переключатель) имеет следующие основные характеристики:

- задержка (англ. *latency*) λ — время, которое требуется коммутатору для обработки пакета;
- очередь (англ. *queue*) сообщений q — набор сообщений, прибывших в коммутатор и ждущих обработки.

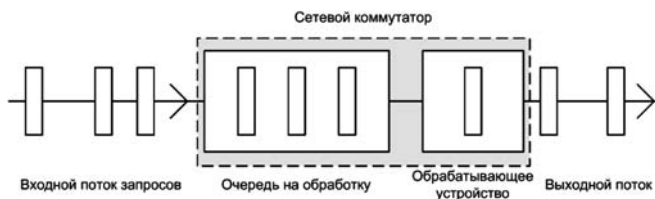


Рис. 1. Модель обработки пакетов в сетевом коммутаторе

Основные элементы модели сетевого коммутатора (рис. 1):

- входной поток запросов — сетевые пакеты, поступающие на вход сетевого коммутатора;
- очередь на обработку — набор сообщений, прибывших в коммутатор и ожидающих его освобождения для их обработки;
- обрабатывающее устройство — модуль коммутатора, который определяет, на какой из выходов необходимо перенаправить пакет;
- выходной поток запросов, состоящий из пакетов, покинувших коммутатор.

Пакеты поступают на вход коммутатора в порядке, который определяется алгоритмом приложения. Если в момент поступления запроса его очередь пуста и само устройство свободно, то коммутатор приступает к его обработке, которая занимает время, равное времени его задержки.

Если в момент прибытия запроса очередь пуста, но обрабатывающее устройство занято, то пакет попадает в очередь сообщений и ждет момента, когда коммутатор освободится. Если же в момент прибытия запроса очередь оказывается не пустой, то он оказывается в конце очереди. Предполагается, что память, используемая для хранения очереди, достаточно велика для содержания всех сообщений, прибывших в коммутатор. Таким образом, ни одно сообщение не может быть утеряно, и все они будут обработаны. Обработка запросов происходит по принципу "первый пришел — первым обработан" (англ. *First-In First-Out, FIFO*).

В данной модели входной поток запросов играет роль потока пакетов, поступающих на вход сетевого коммутатора; очередь соответствует входному интерфейсу коммутатора. Задержка моделирует процессы обработки пакетов процессором и направления их на соответствующие выходные интерфейсы. Предполагается, что после обработки пакет мгновенно покидает коммутатор — нет задержки в выходном потоке запросов. Она приписывается следующему по пути следования коммутатору.

Стратегии выбора пути. В сетях между двумя узлами может существовать более одного пути. По этой причине проблемой является вопрос о выборе оптимального маршрута, по которому коммуникация между этими узлами будет наиболее эффек-

тивной. Этот выбор может быть очевиден в случае, когда выбирать приходится между маршрутами разной длины. Однако может возникнуть ситуация, в которой выбирать придется между путями одной длины. В таком случае необходимо учитывать текущую загруженность коммутаторов, соблюдать условия балансировки нагрузки или использовать иные критерии. Ниже будут предложены некоторые стратегии, с помощью которых можно осуществить этот выбор.

Каждая из предложенных ниже стратегий стремится минимизировать некоторую величину, связанную с производительностью всей системы. Для первой стратегии это суммарное число пакетов, прошедших через каждый коммутатор маршрута; для второй стратегии — суммарная длина всех пакетов, прошедших через путь; для третьей — суммарная длина очереди сообщений всех коммутаторов маршрута; для четвертой — суммарная длина всех пакетов, находящихся в очереди сообщений коммутаторов данного пути.

Метрики производительности. Опишем основные величины, которыми можно охарактеризовать производительность сетевого коммутатора, а также введем их обозначения [2].

Производительность (англ. *throughput*) X — отношение числа обработанных пакетов C к длине наблюдаемого отрезка времени T .

Пропускная способность (англ. *bandwidth*) W — отношение размера обработанных пакетов L к длине наблюдаемого отрезка времени T .

Обозначим через N — среднее число запросов в системе.

Длительность пребывания (англ. *residence time*) R — время, в течение которого пакет находился внутри сетевого коммутатора.

Время занятости B — время, затраченное коммутатором на обработку запросов.

Использование (англ. *utilization*) U — отношение времени занятости B к длине наблюдаемого отрезка времени T .

Среднее требование к обслуживанию за запрос (англ. *the average service requirement per request*) S — отношение времени занятости B к числу обработанных запросов C .

Приведем некоторые дополнительные соотношения между введенными величинами.

Один из фундаментальных законов — закон использования (англ. *the Utilization Law*):

$$U = XS. \quad (1)$$

Его доказательство можно найти в работе [2].

Другое важное соотношение — закон Литтла (англ. *Little's Law*):

$$N = XR. \quad (2)$$

Доказательство можно найти также в работе [2].

Исследуемое приложение, аппаратура и инструменты

В качестве исследуемой была взята программа *mdrun* из пакета молекулярной динамики Gromacs [7]:

- версия программы 4.5.4;
- опции сборки: поддержка MPI, двойная точность (*double*) вычислений;
- библиотека MPI — MPICH 1.4.1p1;
- использованный компилятор: Intel Compiler версии 12.1.0 20110811 из состава Intel Composer XE 2011 SP1 6.233;
- операционная система — Debian GNU/Linux версия 6.0, 64-битная архитектура.

Для моделирования работы приложения использовали приложение Wind River Simics [6] версии 4.6. Для изучения сетевого взаимодействия и нагрузок на сетевые коммутаторы (англ. *switch*) необходимо собирать и анализировать сетевые пакеты, проходящие через них. Для этих целей использовали анализатор трафика компьютерных сетей Ethernet Wireshark 1.6.8 [8]. Подробное описание принципов интеграции Simics с Wireshark дано в работе [9]. На рис. 2 (см. третью сторону обложки) показано их соединение на первой стадии экспериментов. С помощью Simics моделировалась система, состоящая из вычислительных узлов и одного головного узла. На каждом узле запускалось по 16 потоков. Вся система взаимодействовала через единственный сетевой коммутатор, на котором проводился захват (англ. *capture*) пакетов с помощью Wireshark. Полученная трасса экспортировалась в текстовый формат CSV для дальнейшего анализа.

Для анализа полученной трассы была написана программа на языке Python 2.7.3 [4]. С ее помощью моделировали различные сетевые топологии и измеряли среднюю пропускную способность через каждый коммутатор, принадлежащий рассматриваемой сети. В данном исследовании были рассмотрены следующие сетевые топологии: "утолщенное дерево" (англ. *fat-tree*) (рис. 3, *a*, см. третью сторону обложки), "звезда" (англ. *star*) (рис. 3, *б*, см. третью сторону обложки), "сетка" (англ. *mesh*) (рис. 3, *в*) и "кольцо" (англ. *ring*) (рис. 3, *г*).

Рассмотрим достоинства и недостатки исследуемых топологий:

1. "Утолщенное дерево" (рис. 3, *a*). Главным достоинством этой сети является простота добавления новых узлов и отказоустойчивость. Однако поиск и устранение неисправностей может занять много времени.

2. "Звезда" (рис. 3, *б*). Основные достоинства данной сети: легкий поиск неисправностей, простота конфигурации и хорошая масштабируемость. Недостатком является наличие центрального элемента, через который идет весь трафик. Нарушение его работы скажется на всей сети. Также центральный коммутатор ограничивает число подключаемых узлов числом портов.

3. "Сетка" (рис. 3, *в*). Выход из строя небольшого количества соединений почти не отражается на работе сети. Нет проблем с маршрутизацией, так как каждый узел имеет прямое соединение с остальными. Однако данная сеть имеет ряд недостатков: добавление нового узла требует большого числа сетевых элементов; для создания сети с такой топологией необходимо большое количество оборудования.

4. "Кольцо" (рис. 3, *г*). Простая для установки и администрирования сеть. Простой поиск и устранение неисправностей. Выход из строя рабочей станции или разрыв соединения отображается на работоспособности всей сети. Добавление или удаление одного элемента требует остановки всей системы.

Ниже приведены результаты двух типов измерений: проверка корректности модели; сравнение характеристик производительности с экспериментальными данными, полученными моделированием различных сетевых топологий и кластерных систем разного объема.

Проверка корректности модели. Корректность выбранного времени синхронизации и длины трассы проверяли на модели кластера, состоящего из 16 вычислительных узлов и имеющего топологию "звезда" (рис. 3, *б*).

На рис. 4 приведен график, показывающий зависимость средней пропускной способности от длины наблюдаемого отрезка времени *T*. Горизонтальная линия графика показывает среднюю пропускную способность за все время работы приложения (600 с). Видно, что спустя 100 моделируемых секунд средняя пропускная способность начинает плавно стремиться к постоянной величине, равной средней пропускной способности за время работы программы. Исходя из этих наблюдений, было принято решение собирать трассу за время не более 200 с, так как погрешность, вносимая этим ограничением, мала (составляет 3%), а время моделирования трассы значительно сокращается.

В таблице приведены результаты, показывающие, что выбранное время синхронизации доста-

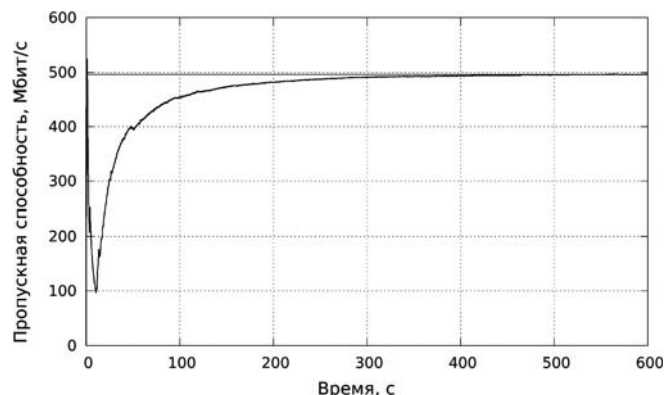


Рис. 4. Зависимость средней пропускной способности от времени

Результаты измерений средней пропускной способности в зависимости от времени синхронизации

Время синхронизации, с	Средний поток, Мбит/с
$4 \cdot 10^{-3}$	481,517
$4 \cdot 10^{-4}$	490,902
$4 \cdot 10^{-5}$	492,499
$4 \cdot 10^{-6}$	505,563

точно для отображения реальности. По этой причине мы проводили измерения, установив время синхронизации 10^{-6} с в целях уменьшения времени сбора трассы. Погрешность вычисления средней пропускной способности при этом составляет примерно 2,9 %.

Сравнение различных топологий. Сравнение топологий приводили для различных кластерных систем. Рассматривали системы, имеющие 16, 32, 64 и 128 вычислительных узлов; при этом на каждом вычислительном узле выполнялось по 16 потоков. Время сборки трассы равнялось 200 с. При моделировании использовали третью стратегию выбора маршрута. Результаты вычисления средней пропускной способности (Мбит/с) представлены на рис. 5 (см. третью сторону обложки).

Видно, что топология "сетка" имеет минимальную среднюю пропускную способность. Однако такая сеть требует большого числа сетевых элементов. Оно может быть вычислено по следующей формуле:

$$Q(N) = (N + 1)N/2, \quad (3)$$

где $Q(N)$ — число сетевых элементов, необходимых для создания сети из N вычислительных узлов и одного головного.

Для создания сети из 128 вычислительных узлов с топологией "сетка" потребуется 8256 сетевых элементов, что даст уменьшение нагрузки на оборудование в 183 раза по сравнению с топологией "звезда". "Утолщенное дерево" дает уменьшение нагрузки в 3 раза, однако требует всего 6 коммутаторов. Топология "звезда" не подходит для больших систем, так как нагрузка на единственный сетевой коммутатор сильно возрастает, что может привести к большим задержкам в сети и потере пакетов.

Заключение

В работе описан способ моделирования сетевого взаимодействия приложений. Была предложена модель сетевого коммутатора, введены и описаны

величины, которыми можно оценивать производительность системы, предложены различные стратегии выбора пути между двумя узлами.

Сеть с топологией "звезда" не подходит для больших вычислительных систем, так как большая нагрузка на единственный сетевой коммутатор может привести к потере пакетов, что, в свою очередь, приведет к ухудшению работоспособности всей системы в целом. Из измерений видно, что нагрузка на сетевое оборудование оказывается минимальной при построении сети с топологией "сетка". Однако для создания такой сети требуется большое количество оборудования. Компромиссом является сеть с топологией "утолщенное дерево". Для ее конфигурации требуется гораздо меньше оборудования, чем для сети с топологией "сетка". При этом наблюдается значительное снижение нагрузки на сетевые элементы. Отсюда можно сделать вывод, что сеть с топологией "сетка" может быть использована для достижения максимальной производительности системы, но это нецелесообразно, так как можно добиться схожего уровня производительности при меньшем количестве сетевого оборудования, используя сеть с топологией "утолщенное дерево".

Работа выполнена в рамках гранта, выделенного в соответствии с постановлением Правительства России № 220 от 09.04.2010 г.

Список литературы

1. **Leiserson C. E.** Fat-Trees: Universal Networks for Hardware-Efficient Supercomputing // IEEE Transactions on Computers. October 1985. Vol. C-34, No. 10.
2. **Lazowska E. D., Zahorjan J., Graham G. S., Sevick K. C.** Quantitive System Performans. Computer System Analysis Using Queueing Network Models. // New Jersey: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1984.
3. **Network** simulator NS-3 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nsnam.org/> (26.02.2013).
4. **Van Rossum G., Drake F. L.** Python Tutorial. Release 2.7.3 // Python Software Foundation, 2012. September 11.
5. **Albrecht M. C.** Introduction to Discrete Event Simulation. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.albrechts.com/mike/DES/2010> (25.02.2013).
6. **Magnusson P. S., Christensson M., Eskilson J., Forsgren D., Hallberg G., Hogberg J., Larsson F., Moestedt A., Werner B.** Simics: A Full System Simulation Platform // IEEE Computer Society Press. February 2002. Vol. 35. P. 50–58.
7. **Van Der Spoel D., Lindahl E., Hess B., Groenhof G., Mark A. E., Berendsen H. J. C.** GROMACS: Fast, flexible, and free // Journal of Computational Chemistry. Vol. 26 (16). 2005. P. 1701–1718.
8. **Orebaugh, Ramirez G., Burke J., Pesce L., Wright J. and Morris G.** Wireshark & Ethereal Network Protocol Analyzer Toolkit. 2006.
9. **Wind River.** Simics Ethernet Networking User's Guide 4.6 — 2012. [Электронный ресурс]. URL: <http://windriver.com/products/simics/> (03.04.2013).

УДК 621.391

С. В. Дворников¹, д-р техн. наук, доц., проф. каф.,

С. С. Дворников², студент,

А. М. Спири¹, канд. техн. наук, преподаватель,

¹ Военная академия связи

² Санкт-Петербургский государственный

политехнический университет

e-mail: practicsv@yandex.ru

Синтез манипулированных сигналов на основе вейвлет-функций

Представлены результаты аналитических исследований и данные компьютерного эксперимента по обоснованию возможности применения вейвлет-функций для синтеза помехоустойчивых сигналов. Предложен подход к выбору вида вейвлет-функции с учетом ее спектральных характеристик. Приведены основные этапы алгоритма, реализующего разработанный научный подход.

Ключевые слова: вейвлет-функции, синтез сигналов, вейвлет-модуляция

Введение

Практическое применение в радиотехнике вейвлет-функций получили благодаря работам Гроссмана и Морле при обработке сейсмических и акустических сигналов [1]. В настоящее время их широко применяют при распознавании образов, исследовании нестационарных колебаний, синтезе речевых сигналов и других задачах анализа сигналов. Также в последнее время вейвлет-функции все чаще применяют для прямого численного моделирования как иерархический базис, адаптированный для описания динамики сложных нелинейных процессов, в том числе и для синтеза на их основе различных типов сигналов. Прежде всего, это обусловлено возможностью конструирования на основе вейвлет-функций ортогональных сигналов для манипуляционных форматов. Так, в работе [2] предложен синтез фазоманипулированных сигналов, имеющих свойства повышенной помехоустойчивости по отношению к их классической форме на основе гармонических функций.

Таким образом, открываются новые направления применения вейвлет-функций в радиотехнике, связанные с синтезом манипулированных сигналов на их основе.

Теоретические основы синтеза сигналов вейвлет-функциями

Вейвлет-функции $\psi(t)$ являются базисными для пространства $L^2(\mathbf{R})$, поскольку с помощью целочисленного масштабирования обеспечивают его реконструкцию. В частности, в работе [1] предложено в качестве аналога синусоидальной частоты использовать следующую форму представления вейвлет-функций: $\psi(2^k t - \tau)$, где τ и k — целые числа ($\tau, k \in \mathbf{I}$). Следовательно, посредством масштабных преобразований ($1/2^k$) и временных сдвигов ($\tau/2^k$) можно описать все частоты и временные интервалы на основе единственной базисной вейвлет-функции $\psi(t)$. Поскольку норма вейвлет-базиса [1]

$$\|\psi(2^k t - \tau)\|_2 = 2^{-k/2} \|\psi(t)\|_2,$$

то при условии, что вейвлет-функция $\psi(t) \in L^2(\mathbf{R})$ имеет единичную норму, все функции базиса $\{\psi_{\tau k}\}$ вида

$$\psi_{\tau k}(t) = 2^{k/2} \psi(2^k t - \tau), \quad \tau, k \in \mathbf{I}, \quad (1)$$

также нормированы к единице, т. е. $\|\psi_{\tau k}\|_2 = \|\psi\|_2 = 1$.

Таким образом, вейвлет-функция $\psi \in L^2(\mathbf{R})$ будет ортогональной, если определенное соотношением (1) семейство $\{\psi_{\tau k}\}$ представляет собой ортонормированный базис функционального пространства $L^2(\mathbf{R})$, т. е.

$$\langle \psi_{\tau k}, \psi_{l m} \rangle = \delta_{\tau k} \delta_{l m}, \quad (2)$$

и каждая функция f указанного пространства, т. е. $f \in L^2(\mathbf{R})$, может быть представлена в виде ряда

$$f(t) = \sum_{k, \tau = -\infty}^{\infty} c_{k\tau} \psi_{k\tau}(t). \quad (3)$$

В общем случае, условий (2) и (3) недостаточно для определения вейвлета в качестве базисной функции. Строгость выполнения этого условия предполагает существование обратных преобразований. Однако на практике достаточно выполнения свойств устойчивости и, согласно работе [3], "приблизительной" ортогональности системы функций разложения.

С указанных позиций для базиса (1) в качестве таких условий выступают свойства адекватности расширения и сдвига исходного вейвлета ($1/2^k$, $\tau/2^k$), $k, \tau \in \mathbf{I}$, и возможность обратной реконструкции с точностью до постоянного множителя, ограничивающего класс возможных базисных функций.

В частности, Фурье-образ для базисных вейвлетов должен быть равен нулю в начале координат.

Таким образом, вейвлет, используемый для реконструкций, должен удовлетворять условиям базиса Рисса, согласно им всегда существуют такие две константы A и B , где $0 < A \leq B < \infty$, для которых соотношение

$$A \| \{c_{k\tau}\} \|_2^2 \leq \left\| \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} c_{k\tau} \psi_{k\tau} \right\|_2^2 \leq B \| \{c_{k\tau}\} \|_2^2$$

выполняется при любой ограниченной и дважды квадратично суммируемой последовательности $\{c_{k\tau}\}$:

$$\| \{c_{k\tau}\} \|_2^2 = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} |c_{k\tau} \psi_{k\tau}|^2 < \infty. \quad (4)$$

В большинстве практических приложений достаточно выполнения свойств полуортогональности для вейвлета, предусматривающего равенство нулю условия (2).

В общем случае условиям существования вейвлета соответствуют производные высоких порядков от функции Гаусса [3]:

$$\psi_m(t) = (-1)^m \partial_t^m [\exp(-t^2/2)], \quad (5)$$

где $\partial_t^m = \partial^m[\dots]/\partial t^m$, $m \geq 1$.

Таким образом, функции, синтезируемые на основе выражения (5), являясь вейвлетами, удовлетворяют условиям формирования на их основе базисов.

В настоящее время методология вейвлетов наиболее широкое применение нашла в различных областях обработки сигналов, связанных с решением вопросов фильтрации, анализа, распознавания. Между тем способность формирования вейвлетами функциональных базисов [см. формулу (1)] открывает новые возможности, в частности, по синтезу сигналов. Действительно, принцип передачи информации базируется на физических различиях радиосигналов, соответствующих различным компонентам информационного алфавита. Так, при амплитудной модуляции указанные различия наблюдаются в изменении амплитуды, при частотной модуляции — в изменении номиналов несущих частот, а при фазовой модуляции — в изменениях позиции фазы. Очевидно, что аналогичным образом в процессе модуляции можно использовать вместо несущих колебаний и вейвлеты. При этом следует

учитывать, что в отличие от гармоник вейвлеты локализованы не только в частотном, но и во временном пространстве. Следовательно, их применение оправдано в манипуляционных системах, в которых четко локализован единичный элемент сигнала. В первую очередь, к таковым следует отнести дискретные частотные и фазовые манипуляционные форматы. Тогда при каждой смене позиций можно в качестве несущего колебания использовать новый вид вейвлета. Для двухпозиционных форматов (двойная фазовая манипуляция или двойная частотная манипуляция) возможно применение в качестве второго несущего колебания инверсной формы вейвлета.

Таким образом, вейвлеты, способные формировать функциональные базисы, вполне могут быть использованы для синтеза сигналов частотной и фазовой манипуляции.

Синтез сигналов вейвлет-модуляции

В настоящее время одним из наиболее помехоустойчивых видов манипуляционных форматов является двойная фазовая манипуляция (ФМ-2). Принцип ее реализации состоит в инверсии фазы при смене позиции. Так на рис. 1 показана временная диаграмма тестового сигнала ФМ-2 длительностью в 312 дискретных отсчетов. Верхний индекс здесь и далее указывает на базис формирования сигнала. На рис. 1 индекс Γ указывает на гармонический базис.

Для сигнала ФМ-2 каждый из битовых символов характеризуется сменой фазы несущего колебания.

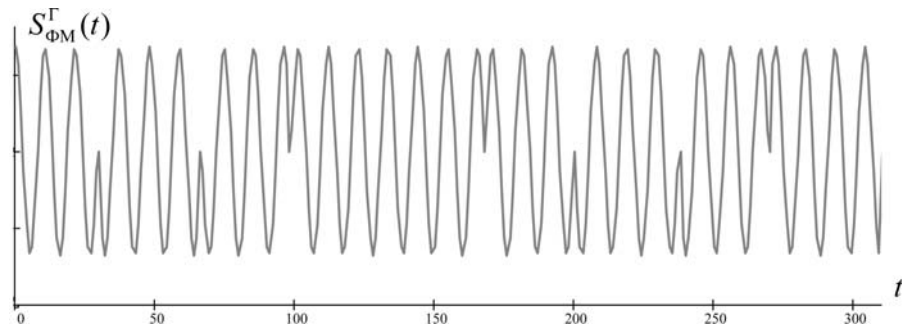


Рис. 1. Временная развертка тестового сигнала ФМ-2 на основе гармоник

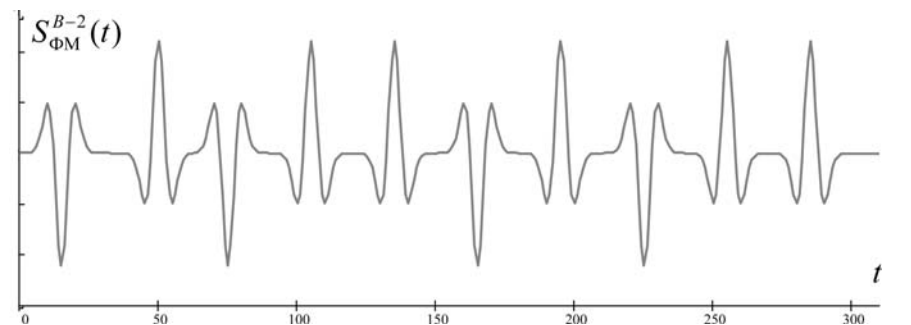


Рис. 2. Временная развертка тестового сигнала ФМ-2 на основе вейвлетов при $m = 2$

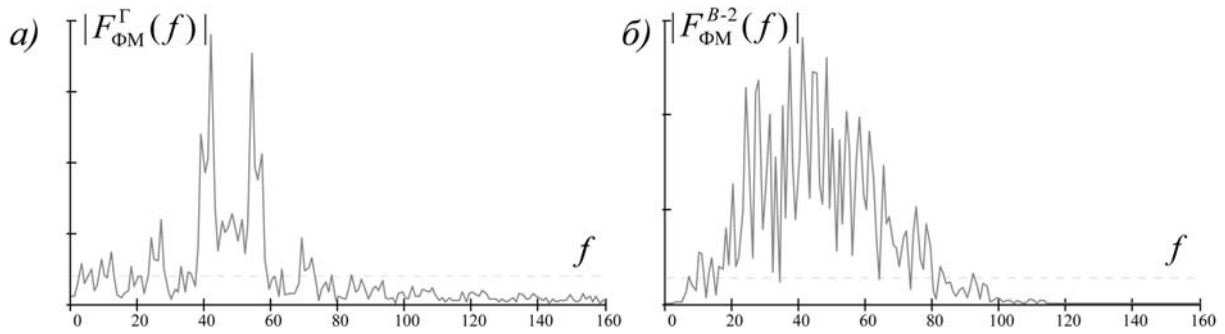


Рис. 3. Спектры сигналов ФМ-2: а — на основе гармонического базиса; б — на основе базисов вейвлетов при $m = 2$

Сигнал ФМ-2 относится к классу узкополосных сигналов, у которых база $B = 1$, и согласно [4] определяется как

$$B = \Delta F \tau, \quad (6)$$

где τ — длительность элемента сигнала; ΔF — ширина его спектра.

В общем случае параметр B определяет помехоустойчивость. Так отношение сигнал/шум на выходе приемника q^2 связано с отношением сигнал/помеха на входе приемника h^2 следующим соотношением [4]:

$$q^2 = 2Bh^2, \quad (7)$$

где $h^2 = P_c/P_{\text{п}}$ и $q^2 = \widehat{P}_c/\widehat{P}_{\text{п}}$; $P_c, P_{\text{п}}$ — соответственно мощность сигнала и мощность помехи на входе приемника, а $\widehat{P}_c, \widehat{P}_{\text{п}}$ — соответственно мощность сигнала и мощность помехи на выходе.

Кроме того, величину h^2 можно рассчитать с позиций энергии сигнала E и спектральной мощности шума N_0 :

$$h^2 = 2E/N_0.$$

Соответственно, $E = P_c \tau$, а $N_{\text{п}} = P_{\text{п}}/F$.

С учетом полученных соотношений в работе [2] предложено использовать в качестве несущих колебаний при формировании сигнала ФМ-2 ортогональные вейвлеты, представляющие собой вторую производную от функции Гаусса и рассчитываемые согласно выражению (5) при $m = 2$. На рис. 2 показана временная развертка тестового сигнала ФМ-2, сформированная на основе указанного вейвлета. Здесь индекс В-2 указывает на вейвлет при $m = 2$.

Практический интерес такого подхода состоит в том, что переход к вейвлетам ведет к расширению значимой полосы спектра, занимаемой сигналом. Действительно, на рис. 3 изображены спектры тестовых сигналов ФМ-2, сформированных на основе гармонических колебаний и вейвлетов при $m = 2$.

На представленных спектрах показан порог по уровню $0,1 U_{\text{max}}$. Проведенные в работе [2] исследования указывают на то, что применение вейвлетов в качестве несущих при $m = 2$ ведет к увеличению

базы сигналов ФМ-2 в 3,5 раза. Согласно выражению (7) во столько же раз возрастает и помехоустойчивость.

Между тем, анализ спектров вейвлетов, синтезированных на основе выражения (5), показывает, что увеличение порядка дифференцирования функции, т. е. увеличение значения m , ведет к смещению максимума спектральной плотности на частотной оси при сохранении значимой полосы спектра.

Так на рис. 4 показаны функции огибающих спектров вейвлетов, вычисленных на основе формулы (5) при различных значениях m . Полученный результат обусловлен следующим. Сохранение ширины значимой полосы частот объясняется сохранением длительности формируемой функции при различных значениях m . В то же время повышение степени дифференцирования ведет к увеличению числа осцилляций в синтезируемом вейвлете, что равносильно увеличению частоты заполнения одиночного импульса. Следовательно, если при формировании сигнала ФМ-2 использовать в качестве несущих различные вейвлеты, а не инверсные копии одной и той же реализации функции (5), то можно достичь еще большего увеличения базы. В частности, предлагается использовать вейвлеты при $m = 1$ и $m = 8$. Пример такой реализации для тестового сигнала ФМ-2 показан на рис. 5. Здесь верхний индекс указывает на использование вейвлетов при $m = 1$ и $m = 8$.

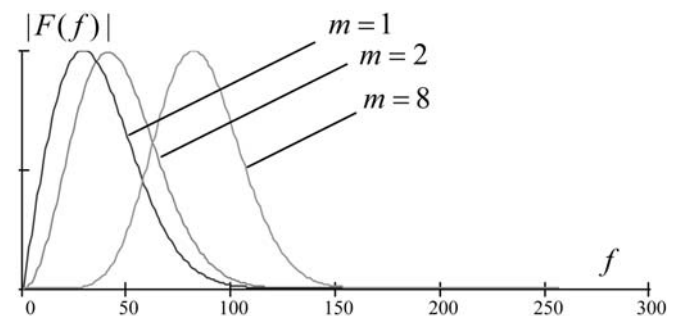


Рис. 4. Функции огибающих спектров вейвлетов при различных значениях m

Такой выбор вейвлет-базиса обусловлен тем, что точка пересечения функций спектральных огибающих для $m = 1$ и $m = 8$ проходит по уровню 0,5 от максимального значения, что обеспечивает рацио-

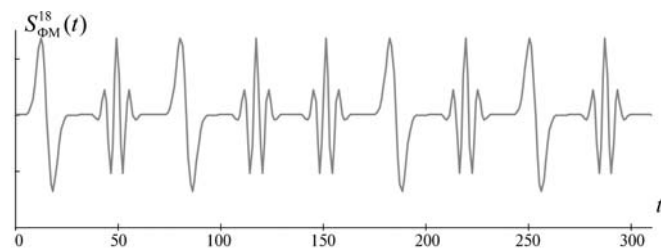


Рис. 5. Временная развертка тестового сигнала ФМ-2 на основе вейвлетов при $m = 1$ и $m = 8$

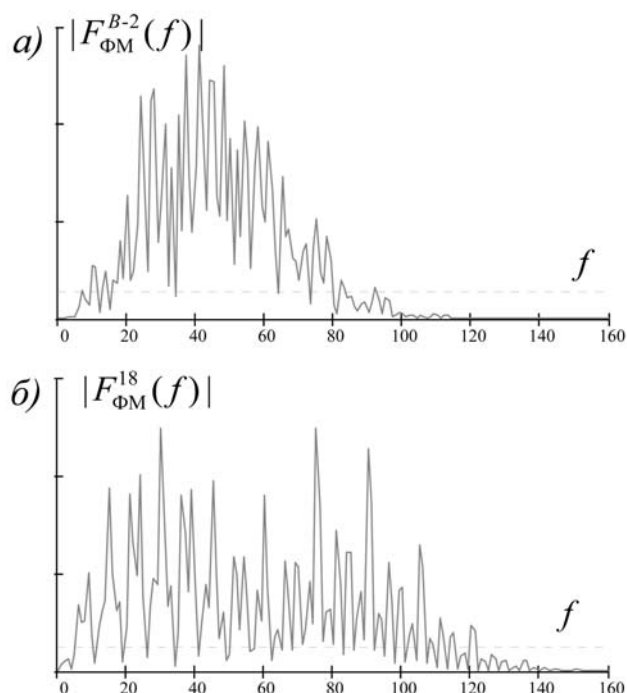


Рис. 6. Спектры сигналов ФМ-2: a — на основе базисов вейвлетов при $m = 2$; b — на основе базисов вейвлетов при $m = 1$ и $m = 8$

нальное распределение спектральной плотности мощности в действующей полосе частот.

На рис. 6 показан спектр тестового сигнала ФМ-2 в рекомендуемом вейвлет-базисе с нанесенным уровнем значимой полосы частот.

В ходе моделирования было установлено, что использование базисов вейвлетов при $m = 1$ и $m = 8$ для синтеза тестового сигнала ФМ-2 ведет к увеличению базы в 4,9 раза по отношению к гармоническому базису и в 1,4 раза по отношению к вейвлет-базису при $m = 2$.

Заключение

Полученные результаты указывают на потенциальную возможность синтеза сигналов в базисе вейвлетов. Причем новые манипуляционные форматы на их основе имеют повышенную помехоустойчивость, обусловленную расширением базы. Следует также отметить, что спектральные различия манипуляционных форматов на основе разнотипных вейвлетов (наличие двух максимумов функции огибающей спектральной плотности) облегчают их демодуляцию.

Дальнейшее направление исследования авторами видится в оптимизации выбора пары вейвлетов для синтеза на их основе манипуляционных форматов, в которых манипуляционная скорость будет определяться длительностью вейвлета, а число используемых типов вейвлетов будет характеризовать значность информационного алфавита.

Список литературы

1. **Wavelets** / Eds. J. M. Combes, A. Grossmann, P. Tchamitchian. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
2. **Способ** формирования помехоустойчивых сигналов: пат. РФ 2412551 от 20.02.2011 г.
3. **Асафьев Н. М.** Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145—1170.
4. **Варакин Л. Е.** Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь. 1985. 384 с.

УДК 519.24 + 519.25

А. В. Антонов, д-р техн. наук, проф., декан,
Н. Л. Сальников, д-р техн. наук, проф.,
М. О. Хромова, аспирант,
В. А. Чепурко, канд. физ.-мат. наук, доц.,
 Обнинский институт атомной энергетики
 (ИАТЭ НИЯУ МИФИ)

Об одной оценке показателей надежности восстанавливаемых технических систем

Предложен новый метод оценивания показателей надежности восстанавливаемых объектов. Метод основан на ядерном оценивании параметра потока отказов по негруппированному и группированному потокам. На втором этапе через известное уравнение восстановления оценивается плотность распределения. Приведены имитационный и практический примеры построения оценки.

Ключевые слова: уравнение восстановления, функция восстановления, параметр потока отказов, ядерная оценка, параметр сглаживания

При работе со статистическими данными ограниченными объемами необходимо использовать статистические процедуры, использующие по максимуму всю имеющуюся информацию. Выбор определенного решения с помощью таких процедур заведомо будет обладать меньшей ошибкой. В этой работе предлагается для оценивания параметра потока отказов (а затем и остальных показателей надежности восстанавливаемых объектов), использовать более современные методы, учитывающие как отказы с известными моментами их возникновения, так и отказы, распределенные по интервалам работоспособности (группированные моменты потока отказов).

Уравнения восстановления

Для оценки безотказности восстанавливаемых объектов, как известно, применяют два основных показателя надежности: средняя наработка на отказ и параметр потока отказов (ППО). Наряду с ППО в расчетах и обработке экспериментальных данных часто используют осредненный параметр потока отказов. Наше исследование будет посвящено оцениванию ППО в целях получения оценок распределения наработки между отказами.

Для начала определим основные вероятностные характеристики потока отказов восстанавливаемых

мых систем (см. [1—3]). Будем предполагать, что восстановление происходит мгновенно, в этом случае момент восстановления будет совпадать с моментом отказа, и поэтому в нижеследующих терминах понятия "отказ" и "восстановление" будут взаимозаменяемы. Пусть $r(t)$ — число отказов (или восстановлений) к моменту времени t .

Функцией восстановления (ФВ) $\Omega(t)$ называется среднее число (математическое ожидание числа) восстановлений к моменту времени t : $\Omega(t) = Mr(t)$. ФВ связана с функциями распределения моментов восстановлений следующим уравнением:

$$\Omega(t) = \sum_{i=1}^{\infty} F_{\tau_i}(t), \quad (1)$$

где $F_{\tau_i}(t)$ — функция распределения случайной величины τ_i i -го момента восстановления.

Параметром потока отказов называется производная функции восстановления $\omega(t) = \Omega'(t)$:

$$\omega(t) = \Omega'(t) = \sum_{i=1}^{\infty} f_{\tau_i}(t), \quad (2)$$

$f_{\tau_i}(t)$ — плотность распределения случайной величины τ_i i -го момента восстановления.

Уравнения (1), (2) в лапласовском выражении будут выглядеть следующим образом:

$$\tilde{\Omega}(p) = \sum_{i=1}^{\infty} \tilde{F}_{\tau_i}(p) = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^{\infty} \tilde{f}_{\tau_i}(p), \quad \tilde{\omega}(p) = \sum_{i=1}^{\infty} \tilde{f}_{\tau_i}(p).$$

Пусть $f_{\xi}(t)$ — плотность распределения случайной величины ξ — наработки между отказами. Тогда преобразование Лапласа плотности $\tilde{f}_{\tau_i}(p) = [f_{\xi}(p)]^i$,

где $\tilde{f}_{\xi}(t)$ — преобразование Лапласа функции $f_{\xi}(t)$.

Следовательно, $\tilde{\omega}(p) = \frac{\tilde{f}_{\xi}(p)}{1 - \tilde{f}_{\xi}(p)}$.

Таким образом, ППО связан с плотностью распределения наработки между отказами уравнением

$$f_{\xi}(t) = \omega(t) - \int_0^t \omega(t - \tau) f_{\xi}(\tau) d\tau, \quad (3)$$

а ФВ — с функцией распределения наработки между отказами уравнением

$$F_{\xi}(t) = \Omega(t) - \int_0^t \Omega(t - \tau) dF_{\xi}(\tau). \quad (4)$$

Решение интегральных уравнений (3), (4) позволяет по известному ППО (или ФВ) оценивать плотность распределения или функцию распределения наработки между отказами. По известной плотности распределения можно определить такие показатели надежности объекта как средний ресурс и срок службы, гамма-процентный ресурс и срок службы и т. д. (см. [1, 2]). Другими словами, плотность распределения наработки между отказами является важнейшей характеристикой, необходимой для расчета основных показателей надежности.

Достаточно часто поток формируют отказы m однотипных объектов, т. е. идентичные объекты эксплуатируются в одинаковых условиях. При этом предположении "однородности" потоков отказов, очевидно, что ФВ, а, следовательно, и ППО будут обладать свойством сложения потоков:

$$\Omega_m(t) = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{\infty} F_{\tau_i^{(k)}}(t) = m \sum_{i=1}^{\infty} F_{\tau_i^{(*)}}(t) = m\Omega(t), \quad (5)$$

где $\Omega(t)$ — ФВ потока произвольного из m объектов, а $\Omega_m(t)$ — ФВ потока m объектов; $F_{\tau_i^{(k)}}(t)$ и $F_{\tau_i^{(*)}}(t)$ — функции распределения случайных величин $\tau_i^{(k)}$ i -го момента восстановления k -го объекта и $\tau_i^{(*)}$ i -го момента восстановления произвольного объекта, соответственно;

$$\omega_m(t) = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{\infty} f_{\tau_i^{(k)}}(t) = m \sum_{i=1}^{\infty} f_{\tau_i^{(*)}}(t) = m\omega(t), \quad (6)$$

где $\omega_m(t)$ — ППО m объектов, $f_{\tau_i^{(k)}}(t)$ и $f_{\tau_i^{(*)}}(t)$ — плотности распределения случайных величин $\tau_i^{(k)}$ i -го момента восстановления k -го объекта и $\tau_i^{(*)}$ i -го момента восстановления произвольного объекта, соответственно, $\omega(t)$ — ППО произвольного из m объектов.

Единственным способом оценивания неизвестного распределения наработки между отказами в этом случае будет оценка функций $\Omega_m(t)$, $\omega_m(t)$, затем, используя (5) и (6), оценка функций $\Omega(t)$, $\omega(t)$ и решение уравнений (3), (4). Далее рассмотрим возможные способы представления статистики об отказах восстанавливаемых объектов.

Виды исходной информации

Поступающие статистические данные об отказах восстанавливаемых объектов могут быть представлены в следующем виде.

1. Известны моменты отказов для каждого из однотипных объектов, т. е. $\tau_{1,1}, \tau_{1,2}, \dots, \tau_{1,n_1}$ — мо-

менты отказов первого объекта, $\tau_{2,1}, \tau_{2,2}, \dots, \tau_{2,n_2}$ — моменты отказов 2-го объекта и т. д. В этом случае можно получить значение каждой наработки между отказами простым вычитанием из данного момента отказа предыдущего: $\tau_{i,j+1} - \tau_{i,j}$. Дальнейшая статистическая обработка будет вполне очевидна. Для анализа распределения наработки могут быть применены классические статистические процедуры, например, построение эмпирической функции распределения, гистограммы, ядерной оценки плотности. Остальные показатели надежности будут вычисляться по полученной оценке плотности распределения наработки между отказами.

2. Известны моменты отказов не для каждого конкретного объекта, а для совокупности однотипных объектов, при этом известно число таких объектов, т. е. по каким-либо причинам потеряна информация о том, какой именно объект отказал в данный момент времени и статистика представляет собой упорядоченный массив известных моментов отказов — $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$. В данной ситуации получить наработку между отказами не представляется возможным. Статистическая обработка такой информации будет в первую очередь связана с качественной оценкой характеристик потока отказов, к которым относятся ППО и ФВ.

3. Известно число отказов однотипных элементов в течение заданного промежутка времени (к примеру, года эксплуатации) и число элементов в составе устройства. При этом наработки между отказами неизвестны. Назовем такого рода информацию, когда данные представлены в виде частот отказов v_1, v_2, \dots, v_n , группированным потоком отказов, или отказами, распределенными по интервалам работоспособности.

Во всех указанных случаях известно число однотипных объектов в составе системы и время наблюдения за объектами T . С одной стороны, очевидно, что от первого способа описания исходных данных ко второму и от второго к третьему, представление данных существенно упрощалось. С другой стороны, что более важно, происходила ощутимая потеря информации. Из имеющейся статистики, во втором и третьем случае уже не представляется возможным извлечь сами наработки между отказами. Следовательно, казалось бы невозможно оценить функцию распределения наработки. Однако ввиду того, что плотность распределения наработки и ППО, функция распределения и ФВ связаны известными интегральными уравнениями восстановления (3), (4), при качественной оценке характеристик потока можно затем через интегральное уравнение попытаться "восстановить" распределение наработки. С учетом такой возможности и построена ядерная оценка ППО.

Статистическая оценка характеристик потока отказов

В работе [5] функция восстановления оценивается по известным реализациям потока $\tau_{1,1}, \tau_{1,2}, \dots, \tau_{1,n_1,T}; \tau_{2,1}, \tau_{2,2}, \dots, \tau_{2,n_2,T}; \dots; \tau_{m,1}, \tau_{m,2}, \dots, \tau_{m,n_m,T}$. По этим данным можно определить $\xi_{i,j}$ — интервал между моментами j -го и $j+1$ -го отказов в i -й реализации. Затем строится наилучшая несмещенная оценка ФВ:

$$\hat{\Omega}_{m,T}(x) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{q=1}^{n_{i,T}} q \frac{v_{i,q}(x) - v_{i,q+1}(x)}{n_{i,T}^{[q]}}, \quad (7)$$

где $v_{i,j}(x) = \sum_{r=1}^{n_{i,T}^{[q]}} I \left\{ \sum_{r=1}^q \xi_{i,j_r} \leq x \right\}$ — число различных

подпоследовательностей $(\xi_{i,j_1}, \dots, \xi_{i,j_q})$ длины q ,

для которых справедливо неравенство $\sum_{r=1}^q \xi_{i,j_r} \leq x$;

$n_{i,T}^{[q]} = A_{n_{i,T}}^q = \frac{n_{i,T}!}{q!}$ — общее число таких подпоследовательностей, определяемое комбинаторным числом размещений. Оценка (7) является состоятельной и асимптотически нормальной. При $T \rightarrow \infty$ вычисление (7) затруднительно и применяется упрощенная формула

$$\hat{\Omega}_{m,T}(x) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{1 + n_{i,T-x}} \sum_{j=0}^{n_{i,T-x}} (n_{i,x+s_j}^{[q]} - j), \quad (8)$$

где $s_j = \sum_{r=1}^j \xi_{i,r}$. Необходимо отметить, что для на-

ших исходных данных применение оценок (7), (8) невозможно. Кроме того, если бы у нас имелись полные реализации, то оценивание ФВ было бы излишней роскошью, поскольку наша основная цель состоит в оценке распределения наработки между отказами. Имея реализации этих наработок можно оценить плотность распределения напрямую, не решая уравнения восстановления (3) или (4). Для этого можно воспользоваться, например, ядерной, проекционной оценкой плотности распределения или обычной гистограммой.

Оценка параметра потока отказов аналогична гистограммной оценке плотности распределения [3, 6]:

$$\hat{\omega}_{m,T}(x) = \frac{r(\Delta_x)}{m|\Delta_x|}, \quad \text{для всех } x \in \Delta_x, \quad (9)$$

где $r(\Delta_x)$ — число отказов, произошедших на промежутке Δ_x ; $|\Delta_x|$ — длина промежутка Δ_x . Такая оценка (как и обычная гистограмма) при $\Delta_x \rightarrow 0$, будет асимптотически несмещенной и состоятельной

при $m \rightarrow \infty$. Интегрируя (9) можно получить еще одну (гистограммную) несмещенную и состоятельную оценку ФВ, являющейся аналогом эмпирической функции распределения:

$$\hat{\Omega}_{m,T}(x) = \frac{r(x)}{m}, \quad (10)$$

где $r(x)$ — число отказов, произошедших до момента времени x . Оценка (10) будет представлять собой кусочно-постоянную кумулятивную функцию, скачкообразно увеличивающую свои значения от 0 до n/m , где $n = n_1 + n_2 + \dots + n_m$ — общее число отказов по всем реализациям.

В отличие от предыдущих оценок для получения оценки (10) достаточно иметь упорядоченный массив моментов отказов, а для оценки (9) можно даже использовать группированный поток отказов, построенный с тем же или более мелким шагом Δ_x . Но, к сожалению, прямая подстановка оценок (9) или (10) в уравнения восстановления (3), (4) приводит к решениям, не обладающим свойствами функции и плотности распределения. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что в ряде случаев решение (3) вполне может получиться отрицательным, кроме этого интеграл по всей области определения от полученной функции не всегда будет равен единице. Основным недостатком оценок (9) и (10) состоит в том, что они являются кусочно-постоянными функциями с разрывами на границах промежутков Δ_x . Именно это приводит к указанным дефектам получаемой плотности распределения. В связи с этим в основу идеи построения новой оценки было взято сглаживание оценки (9) или (10). Причем сглаживание осуществляется по типу ядерной оценки плотности Парзена—Розенблатта [7, 8].

Ядерная оценка ППО. Идея и основные свойства

Итак, пусть имеется поток отказов от m объектов:

$$\tau_{(1)} \leq \tau_{(2)} \leq \dots \leq \tau_{(n)}.$$

Естественной оценкой для функций $\Omega(t)$, $\omega(t)$ на некотором интервале времени $t \in [0, T]$ (причем $T \leq \tau_{(n)}$) будут

$$\hat{\Omega}(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \hat{F}_{\tau_{(i)}}(t); \quad (11)$$

$$\hat{\omega}(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \hat{f}_{\tau_{(i)}}(t). \quad (12)$$

Из формул (11), (12) видно, что качество оценивания функций $\Omega(t)$, $\omega(t)$ в первую очередь зависит от качества оценок функции распределения и плотности распределения. Современная теория математической статистики в противовес классической гистограмме в основном предлагает ядерную или проекционную оценки плотности. Как будет показано ниже, наиболее подходящим способом оценивания является ядерная оценка.

Ядерные оценки предложены в 1948 г. Парзенем и Розенблатом [7, 8]. Идея построения оценок основана на законе больших чисел, из которого следует, что среднее арифметическое последовательности N случайных величин с ростом N в том или ином смысле сходится к математическому ожиданию.

Ядерная оценка плотности распределения определяется следующей суммой:

$$\hat{f}_{\tau, N}(t) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N V\left(\frac{t-\tau_i}{h}\right). \quad (13)$$

В качестве ядра $V(x)$ можно взять плотность распределения случайной величины, распределенной по стандартному нормальному закону:

$$V(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \text{ — ядро гауссовского типа.} \quad (14)$$

В выражении (13) параметр локальности h выступает в качестве основного управляющего параметра. Его значение оказывает существенное влияние на вид оценок и на их точность (см. [3]). В 70—80-х годах прошлого века появились так называемые адаптивные ядерные оценки, в которых подбор параметра h осуществлялся тем или иным способом по набору $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$, т. е. подстраивался под статистические наблюдения. Некоторые методы подбора параметра локальности в оценках ядерного типа можно найти в работах [2, 3]. Перейдем к задаче оценивания ППО.

Предположим, что объем реализации потока больше числа объектов, т. е. $n > m$. В этом случае можно предположить, что объем информации достаточно велик для оценивания неизвестной плотности $f_{\xi}(t)$ на временном интервале $t \in [0; T]$, интеграл

по которому $\int_0^T f_{\xi}(t) dt \approx 1$. Если число объектов, на-

ходящихся под наблюдением, $m = 1$, математическое ожидание и дисперсия наработки конечны и равны $M\xi = a$; $D\xi = \sigma^2$ (σ — среднее квадратическое отклонение наработки между отказами ξ), то по центральной

предельной теореме $\tau_{(i)} = \sum_{j=1}^i \xi_j \approx N(ai; \sigma^2 i)$, т. е.

$\tau_{(i)}$ будет асимптотически иметь нормальное распределение с математическим ожиданием $M\tau_{(i)} = ai$ и дисперсией $D\tau_{(i)} = \sigma^2 i$. Поэтому целесообразно взять в качестве ядра плотность распределения по нормальному закону (14), а параметр локальности h , как величину, приближенно равную среднему квадратическому отклонению случайной величины τ_i , необходимо брать переменным: $h(i) = \sigma\sqrt{i}$, где

$\sigma = \sqrt{D\xi}$. Для произвольного m число суммируемых наработок можно оценить по формуле

$$\tau_{(i)} = \sum_{j=1}^{i/m} \xi_j \approx N\left(\frac{ai}{m}; \frac{\sigma^2 i}{m}\right). \quad (15)$$

Учитывая все изложенное выше, получаем оценку ППО:

$$\hat{\omega}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi i m \hat{\sigma}}} \exp\left(-m\left(\frac{t-\tau_i}{\hat{\sigma}\sqrt{2i}}\right)^2\right). \quad (16)$$

Оценку математического ожидания наработки до отказа — \hat{a} можно упростить, используя свойства ведущей функции потока: $\hat{a} = \frac{m}{n} \tau_{(n)}$. Параметр $\hat{\sigma}$

играет роль параметра сглаживания и в дальнейшем предполагается его адаптивное оценивание.

Экспериментальные исследования показали, что оценка ППО по формуле (16) будет иметь смещение, особо ошутимое в хвосте наблюдений. Связано оно с тем, что в (16) используется частичная сумма по n имеющимся наблюдениям и не учитывается сумма

$$\sum_{i=n+1}^{\infty} f_{\tau_{(i)}}(t).$$

Оценим систематическую ошибку ППО. Пусть t — момент времени, в который мы хотим оценить ошибку, тогда

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \sum_{n+1}^{\infty} f_{\tau_{(i)}}(t) \approx \int_N^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi t \sigma}} \exp\left(-\frac{(t-a\tau)^2}{2\tau\sigma^2}\right) dt = \\ &= \frac{at}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_N^{\infty} e^{-\frac{a^2 u^2}{2\sigma^2} - \frac{t^2}{2\sigma^2 u^2}} du = \\ &= \frac{1}{2a} \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{aN-t}{\sqrt{2N}\sigma}\right) + e^{\frac{2at}{\sigma^2}} \operatorname{erfc}\left(\frac{aN+t}{\sqrt{2N}\sigma}\right) \right], \end{aligned}$$

где $\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} e^{-u^2} du$, $N = n/m$. Для оценки

второго слагаемого воспользуемся асимптотикой:

$$\operatorname{erfc}(z) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}z} e^{-z^2}, \text{ тогда}$$

$$\varepsilon(t; \hat{\sigma}) \approx \frac{1}{2a} \operatorname{erfc}\left(\frac{aN-t}{\sqrt{2N}\hat{\sigma}}\right) + \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{2\pi}a} \frac{\sqrt{N}}{aN+t} e^{-\frac{(aN-t)^2}{2n\hat{\sigma}^2}}. \quad (17)$$

Окончательный вид оценки ППО в случае, когда $n > m$:

$$\hat{\omega}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi i m \hat{\sigma}}} \exp\left(-m\left(\frac{t-\tau_i}{\hat{\sigma}\sqrt{2i}}\right)^2\right) + \varepsilon(t). \quad (18)$$

Эта оценка впервые была предложена в работе [11].

Теперь предположим, что у нас имеется группированный поток отказов: $\mathbf{LR} = [(l_1, r_1); (l_2, r_2); \dots; (l_s, r_s)]$ — массив интервалов, на которых произошло $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_s)$ — случайное число отказов. Обычно, l_j и r_j совпадают с началом и (соответственно) окончанием календарного года. Очевидно, что $l_{j+1} = r_j$.

Аналогом ядерной оценки ППО будет

$$\hat{\omega}(t) = \sum_{i=1}^s \frac{v_i}{m(r_i - l_i)} \left[G\left(\frac{t - l_i}{h_1(i)}\right) - G\left(\frac{t - r_i}{h_1(i)}\right) \right] + \varepsilon(t; \sigma_2), \quad (19)$$

где $G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$.

Причем в последней формуле можно учесть то,

что $h_1(i) = \hat{\sigma}_1 \sqrt{-0,5v_i + \sum_{j=1}^i v_j}$ и поправку (17).

Исследование качества оценивания

Исследования качества оценивания проводились в таких средах программирования как Delphi и VBA Microsoft Office Excel. Последнюю среду применяли не только для исследований, но и для разработки пакета макросов построения ядерной оценки ППО и производных показателей надежности восстанавливаемых объектов, таких как плотность распределения наработки между отказами, среднее прямое и обратное остаточное времена и др.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что для исходных данных, представленных в виде потока отказов, ядерные оценки ППО (18) и (19) и полученная в дальнейшем плотность распределения приблизительно совпадают с теоретическими аналогами. Точность оценок (18) и (19) увеличивается с ростом числа объектов m , формирующих поток отказов.

Параметр $\hat{\sigma}_1$ влияет на гладкость полученных оценок ППО и плотность распределения. Исследования показали, что с увеличением $\hat{\sigma}_1$ в целом точность оценок плотности ухудшается за счет роста систематической ошибки. Случайная ошибка, напротив, при этом уменьшается.

Параметры $\hat{\sigma}_2$ и \hat{a} участвуют в расчете поправки для ядерной оценки, которая позволяет "приподнять" значения оценки ППО на конечных этапах наблюдения, чтобы плотность, восстановленная на основе этой оценки, не принимала отрицательных значений.

Исследования показали, что при малых значениях параметра $\hat{\sigma}$ точность оценок низкая, причем значения систематической и случайной ошибок держатся приблизительно на постоянном уровне,

затем систематическая ошибка начинает постепенно уменьшаться и точность оценок повышается. Однако при этом увеличивается граничный эффект, связанный с тем, что в точке 0 плотность моделируемого закона распределения была равна 0, а значения оценок плотности не удовлетворяют этому требованию. Таким образом, параметр $\hat{\sigma}$ не следует брать слишком большим, так как с его ростом значения оценки плотности в точке 0 также возрастают. Для практических расчетов значения этого параметра брали в диапазоне от 0,3 до 3 (эмпирические значения). Причем начинать изменять этот параметр необходимо с меньшего значения до тех пор, пока получаемая через уравнение восстановления плотность распределения не обретет физический смысл.

Исследование влияния параметра \hat{a} на точность оценки плотности показало, что для ядерной оценки плотности распределения группированных данных, полученных на основе выборки из логнормального закона распределения, в случае, если $\hat{a} > 2,3$, значение поправки становится несущественным. Из этого можно сделать вывод, что значение данного параметра не стоит брать слишком большим, чтобы не терялся смысл учета поправки при оценке ППО и плотности распределения.

Практические расчеты

Приведем некоторые практические результаты. Вначале приведем результаты имитационного моделирования (рис. 1, а, б). Нарботки моделировались по нормальному закону с параметрами: среднее $a = 20$, среднее квадратическое отклонение $\sigma = 4$, число объектов, формирующих общий поток отказов — $m = 50$, число интервалов группирования $s = 20$. На рис. 1, а приведены графики теоретического ППО, и двух его оценок, гистограммой и ядерной. На рис. 1, б — теоретическая плотность распределения и получающиеся ее оценки, как решения уравнения (3).

Теперь приведем результаты расчетов плотности распределения наработки на отказ по статистике отказов элементов ПР АЗ (приводов автоматической защиты) системы управления защитой реактора Билибинской АЭС (рис. 2).

В заключение стоит отметить еще раз, что исследование влияния различных параметров на точность оценок показало, что параметрами, от которых более всего зависит точность оценок, являются объем данных об отказах объектов, определяемый числом наблюдаемых объектов и продолжительностью наблюдения, и параметр $\hat{\sigma}$. В плане теоретических изысканий необходимо провести исследования оценок (18) и (19) на предмет их несмещенности и состоятельности. Это предполагается сделать в следующей статье по предложенной теме.

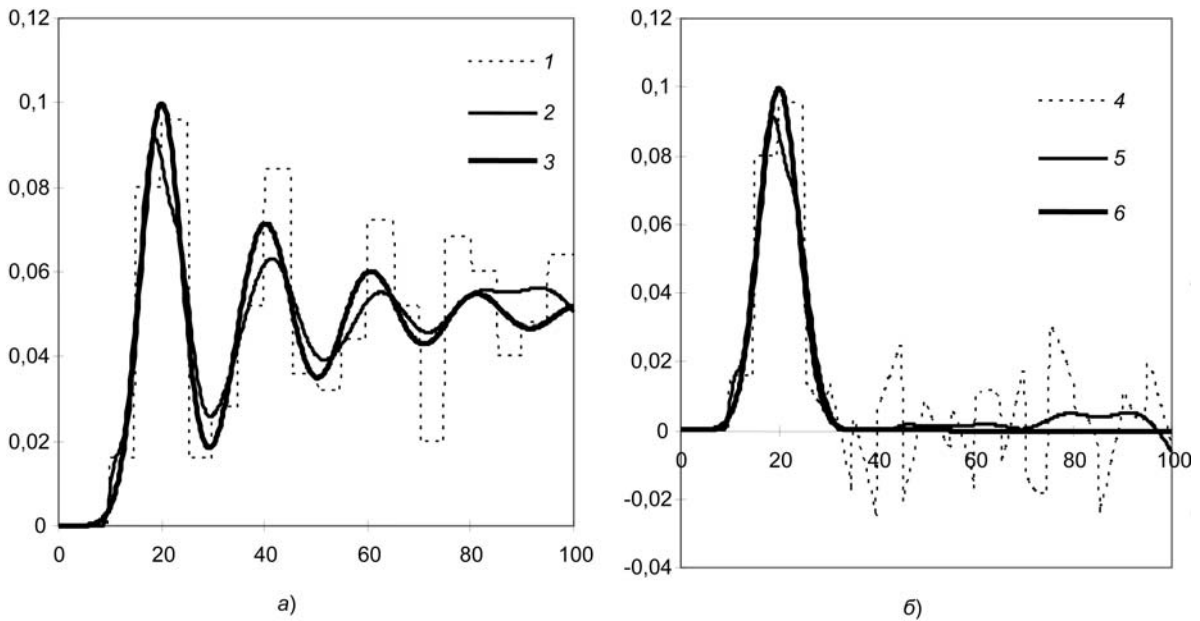


Рис. 1. Оценивание параметра потока отказов и плотности распределения по группированному потоку отказов:
 1 — гистограммная оценка ППО; 2 — ядерная оценка ППО; 3 — теоретический ППО; 4 — плотность распределения при гистограммной оценке ППО; 5 — плотность распределения при ядерной оценке ППО; 6 — теоретическая плотность распределения

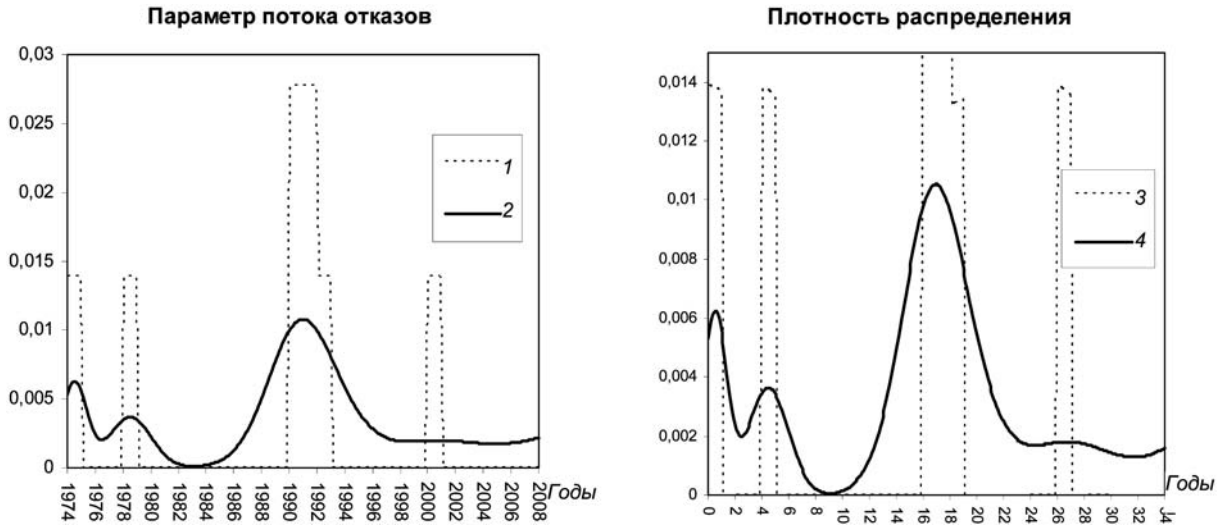


Рис. 2. Параметр потока отказов и плотность распределения наработки ПР АЗ:
 1 — гистограммная оценка ППО; 2 — ядерная оценка ППО; 3 — плотность распределения при гистограммной оценке ППО; 4 — плотность распределения при ядерной оценке ППО

Список литературы

1. **ГОСТ 27.002—89.** Межгосударственный стандарт надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Надежность в технике. М.: Издательство стандартов, 2002.
2. **ГОСТ 27.002—2009.** Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2011.
3. **Острейковский В. А.** Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. М.: Энергоатомиздат, 1994. 288 с.
4. **Байхельд Ф., Франкен П.** Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. М.: Наука, 1984. 328 с.
5. **Надежность и эффективность в технике.** Справочник в 10 т. Т. 2. Математические методы в теории надежности и эффективности / Под ред. Б. В. Гнеденко. М.: Машиностроение, 1987. 280 с.

6. **Половко А. М., Гуров С. В.** Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
7. **Rosenblatt M.** Remarks on some nonparametric estimates of a density function // Annals of Mathematical Statistics. 1956. N 27. P. 832—837.
8. **Parzen E.** On estimation of a probability density function and mode // Annals of Mathematical Statistics. 1962. N 33. P. 1065—1076.
9. **Деврой Л., Дьерфи Л.** Непараметрическое оценивание плотности: L_1 -подход: пер. с англ. М.: Мир, 1988. 408 с.
10. **Катковник В. Я.** Непараметрическая идентификация и сглаживание данных: метод локальной аппроксимации. М.: Наука, 1985. 336 с.
11. **Чепурко В. А.** Ядерная оценка параметра потока отказов // Диагностика и прогнозирование состояния сложных систем: сб. науч. тр. № 15 каф. АСУ. — Обнинск: ИАТЭ, 2004. 28 с.

УДК 004.421

В. А. Власов, магистрант,
e-mail: ihost@mail.ru,
Тулский государственный университет

Метод расширенной интеграции элементов управления в графических приложениях

Рассмотрен метод организации автоматизированного управления приложениями с графическим интерфейсом, обеспечивающий расширенную интеграцию предоставляемых ими визуальных и программных элементов в размещающей среде. Особенностью метода является достижение баланса между степенью автоматизации целевых программных элементов управления и алгоритмической сложностью, а также универсальностью решения.

Ключевые слова: автоматизация управления приложениями, интеграция приложений, графический элемент управления, графический интерфейс, технологии ActiveX, WinAPI

Введение

Решение задачи создания графического пользовательского интерфейса для проектируемого программного комплекса включает выполнение ряда требований. Важно, чтобы создаваемый интерфейс был общепринятым в целевой предметной области и знаком широкому кругу пользователей. Например, электронные документы могут редактироваться в визуальной среде Microsoft Word или OpenOffice Writer, а работа с электронными таблицами осуществляется с помощью продуктов Microsoft Excel или OpenOfficeCalc.

Внешний вид и функциональные возможности элементов управления в этих приложениях являются привычными для пользователей. При включении в собственное программное обеспечение аналогичных элементов целесообразно предоставлять визуальные образы и функциональные возможности, наиболее близкими к эталонным.

Интеграция ActiveX-объекта в приложение без управления его внешним видом

В настоящее время наиболее распространенным семейством операционных систем является Microsoft

Windows. На него ориентирован широкий спектр специализированных программ с графическим пользовательским интерфейсом, используемых в различных сферах деятельности. Microsoft Windows поддерживает технологию ActiveX, которая дает возможность повысить степень автоматизации любых приложений на основании использования единого интерфейса. Особенностью технологии ActiveX является универсальность, позволяющая обеспечить унификацию работы по взаимодействию как с отдельными библиотеками, так и с целыми графическими приложениями. Реализация взаимодействия посредством технологии ActiveX может осуществляться на различных языках программирования.

Технология ActiveX позволяет разрабатывать клиентские приложения, ориентированные на обеспечение требуемой функциональной возможности, а не на выбор отдельных модулей и библиотек заданной версии и поставщика продукта. Подход, использующий технологию ActiveX, основан на подключении инкапсулированных ActiveX-элементов, выполняющих требуемую работу и предоставляющих интерфейс для программного взаимодействия. Также технология ActiveX предоставляет возможность использования специальных протоколов для универсальных идентификаторов ресурсов (URI), которые обеспечивают требуемую функциональную возможность в зависимости от запрошенного действия и автоматический вызов и перенаправление запроса на действия к целевому активному компоненту. Архитектура технологии ActiveX представлена на рис. 1.

Процесс автоматизации управления Microsoft Excel рассматривается в графическом приложении на языке C#. Существует набор библиотек.NET для автоматизации управления приложениями Microsoft Office, однако они не обладают универсальностью, не позволяют взаимодействовать с произвольной



Рис. 1. Архитектура технологии ActiveX

версией приложений, а также проводить автоматизацию управления на более низком уровне, в соответствии с чем в дальнейшем рассматривается общий принцип автоматизации.

Интеграция ActiveX-объекта в приложение с автоматизированным управлением его внешним видом

Автоматизация управления некоторым приложением с графическим интерфейсом в ОС Windows может осуществляться на основании двух принципов. Во-первых необходимо получить экземпляр ActiveX-элемента, посредством которого осуществляется взаимодействие с приложением по его открытому API. Во-вторых, требуется управлять окном целевого приложения, чтобы интегрировать его в собственный программный интерфейс и ограничить его функциональные возможности в соответствии с требованиями задачи.

Алгоритм интеграции главного окна целевого автоматизируемого приложения в разрабатываемую программу (рис. 2) выполняет соединение с COM-объектом, используемым для отправки команд интегрированному приложению и получения от него ответных информационных полей и активных объектов.

В случае использования языка C# возможна интеграция системных WinAPI-функций, позволяющих на низком уровне управлять оконными объектами.

Функция *SetParent* позволяет осуществить установку родительского окна для отображаемого объекта, что дает возможность согласовать фокус ввода, а также логическое расположение элементов.

Функция *SetWindowLong* позволяет установить атрибуты окна, в частности, параметров отображения его граничной рамки, что необходимо для интеграции инкапсулированного системного окна внутрь приложения.

Функция *GetWindowLong* осуществляет извлечение текущих параметров окна.

Функция *SetWindowPos* позволяет установить позицию размещения окна относительно координат привязки в родительском окне, а также обеспечивает принудительную перерисовку объекта окна при необходимости.

Обращение к COM-объекту проводится на основании методов рефлексии, позволяющей осуществлять вызов требуемых членов объекта в режиме исполнения приложения, причем указание идентификаторов может

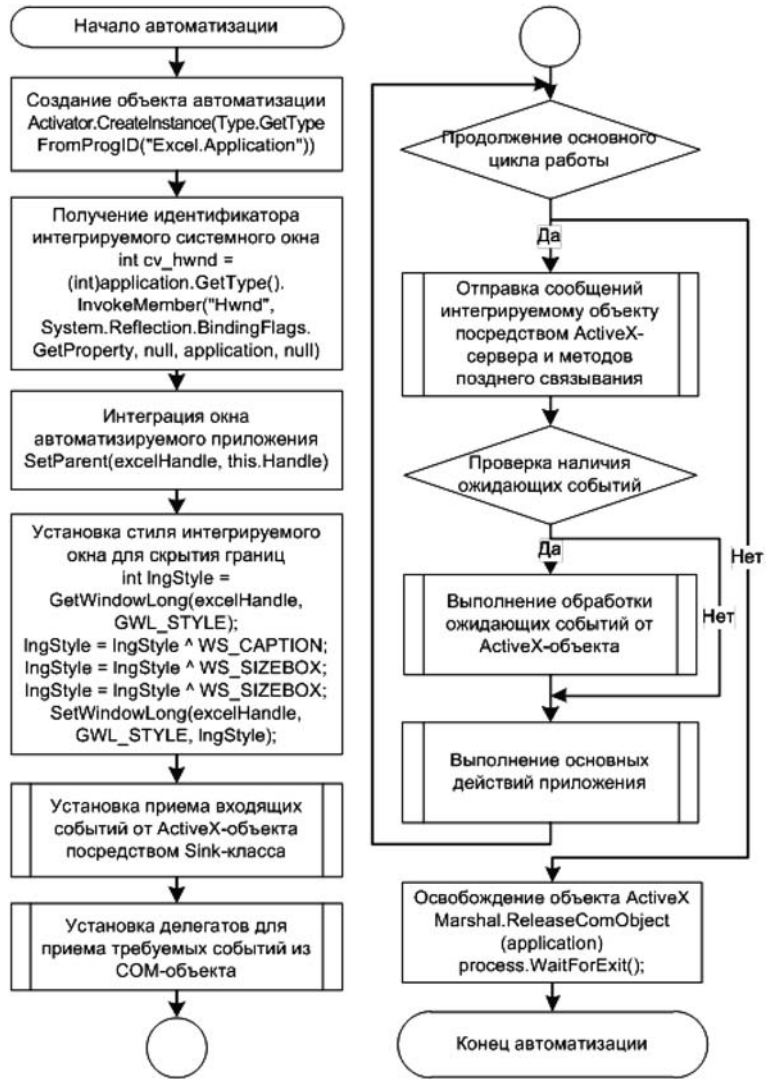


Рис. 2. Блок-схема интеграции окна автоматизируемого приложения

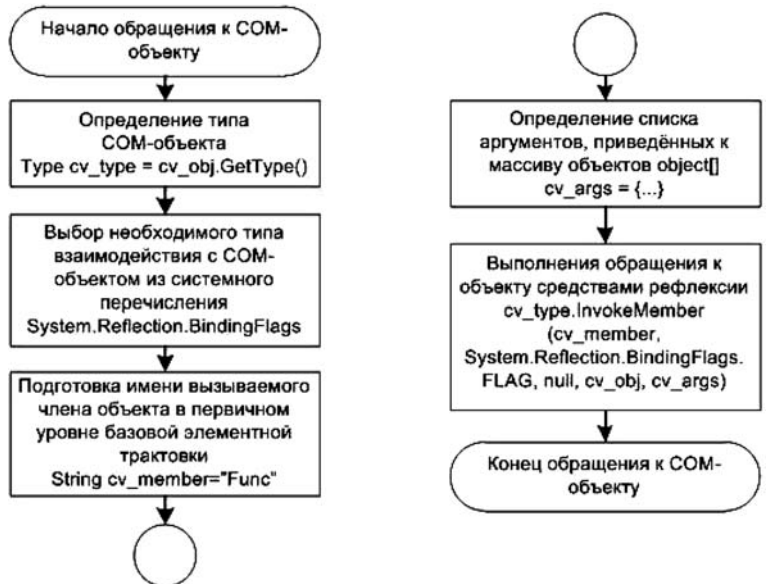


Рис. 3. Блок-схема организации позднего связывания с COM-объектом

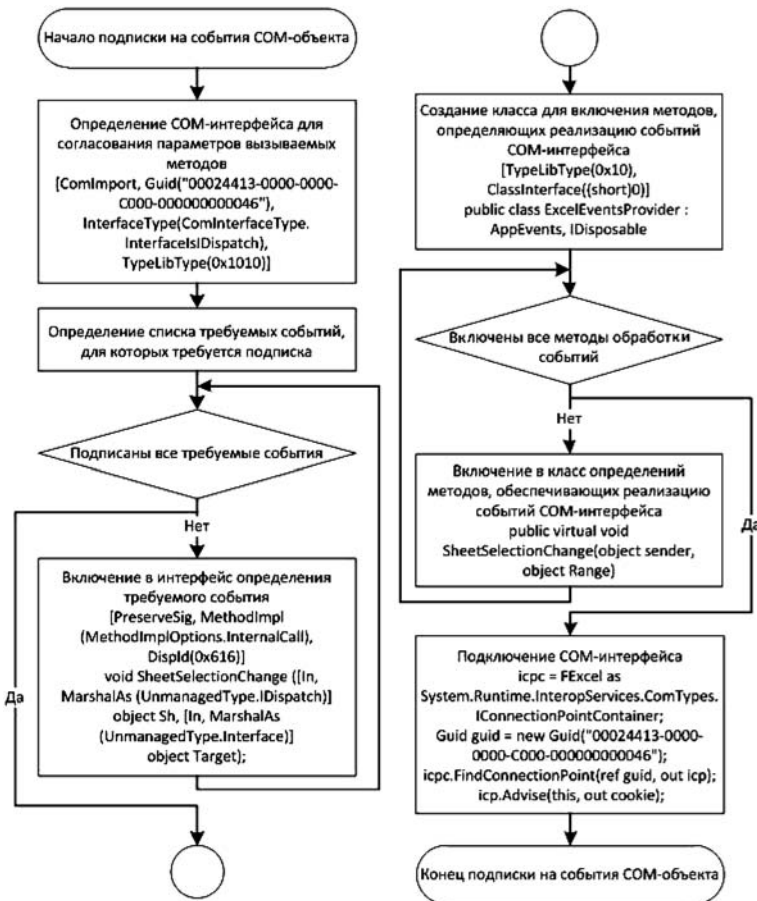


Рис. 4. Блок-схема подписки на события от интегрируемого COM-объекта

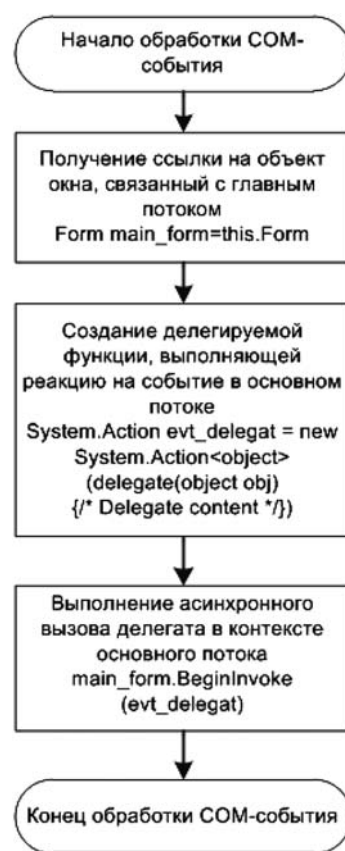


Рис. 5. Блок-схема обработки события от интегрируемого COM-объекта в базовом потоке

обеспечиваться в качестве объекта первого рода с трактовкой в виде информационного поля, что показано на рис. 3.

Обработка событий ActiveX-объекта для организации обратной связи

Обеспечение качественной интеграции визуального интерфейса с целевым приложением достигается в случае подписки на события, что позволяет осуществлять обратную связь и реагировать на возникающие изменения текущего состояния интегрированного приложения. Получение событий в языке C# на основе COM-технологии реализуется на основе создания управляемой версии оригинального COM-интерфейса, поставляемого интегрируемым приложением для определения сигнатур методов, используемых для обработки дифференцированных событий, что показано на рис. 4.

Оригинальный программный COM-интерфейс, обеспечивающий поставку событий и транспортировку ассоциированных информационных полей в Excel, содержит существенный объем методов. Необходимый для работы проектируемого приложения объем событий включает: SheetSelectionChange, SheetActivate, SheetChange, WorkbookOpen, которые обеспечивают реагирование на смену текущего вы-

деления внутри листа, активации и смены листа, а также открытия рабочей книги соответственно.

Особенностью методов генерации событий из предполагаемого списка является тот факт, что последовательного вызова зависимых вложенных элементов не осуществляется. Так, в случае смены текущего листа рабочей книги в Excel проводится и смена активного диапазона ячеек, однако формально будет сгенерировано только событие, ассоциированное с первым действием.

Реализация управляемых C#-методов, используемых для обработки событий из COM-интерфейса Excel, должна быть построена таким образом, чтобы для каждого произошедшего действия осуществлялся явный вызов всех зависимых от него событий, которые не были явно сгенерированы в COM-среде.

В предлагаемой схеме подписки на COM-события вызываемый делегат функции для обработки целевого действия интегрируемого приложения находится в отдельном потоке и в общем случае не может получать доступ ко всем необходимым функциональным элементам основной программы. Решением данной проблемы является создание функционального делегата, выполняющегося в основном потоке, и передача ему инкапсулируемого рабочего объекта, что показано на рис. 5.

После осуществления предполагаемой группы действий по интеграции требуемого приложения в рабочую область программы и налаживания двухстороннего СОМ-взаимодействия возможна реализация требуемой функциональной возможности основной программы. Базовая конфигурация окна интегрируемого приложения построена таким образом, что оно является зависимым от рабочей области основной программы, однако имеет разделяемое переключение фокусов элементов управления.

Указанная особенность может быть использована для того, чтобы обеспечивать совместное редактирование содержимого элементов управления с поддержанием синхронной фокусировки, осуществляемой посредством перевода оригинального интегрируемого объекта в область объекта второго рода относительно оригинального потока исполнения для трактовки в качестве информационного поля.

Практическая реализация методики

Результатом использования рассмотренной методики являются формирование схемы автоматизации управления произвольными приложениями с графическим пользовательским интерфейсом и задействование ассоциированных элементов управления

в области активной действенной составляющей размещающей среды.

Примером клиентского приложения, осуществляющего задействование предполагаемого метода расширенной интеграции элементов управления в графических приложениях, является разработанная автором статьи программа для организации автоматизированного массового распознавания информационных элементов в электронных таблицах Microsoft Excel и выполнения их последующей записи в произвольную реляционную базу данных. На вход приложения поступает существенный объем документов, обладающих сходной визуальной и логической структурой, а на выходе проводится построение XML-документа, используемого для импорта группы информационных полей в базу данных.

На рис. 6 приведен примерный файл электронной таблицы, подлежащий массовому автоматизированному анализу и обладающий следующей характерной особенностью. С точки зрения визуального восприятия информационные поля в документе являются достаточно четко структурированными, однако формальное отношение между элементами, расположенными в различных иерархических уровнях, четко не определено, а идентификация уровней осуществляется исключительно по визуальным или семантическим критериям.

Прайс-лист товаров организации ООО "Торговая компания"								
Физический адрес организации:			Город, ул. Улица, д. 10					
Адрес склада для самовывоза:			Город, ул. Улица, д. 10					
Контактный телефон:			+7 495 111-11-11					
Представленный ассортимент товаров и их стоимость в прайс-листе актуальна с 01.08.2013 по 30.09.2013								
Наименование товара	Артикул	Розничная стоимость		Мелкооптовая стоимость		Крупнооптовая стоимость		
		Без НДС	с НДС	Без НДС	с НДС	Без НДС	с НДС	
1. Товары для офиса								
1.1. Канцелярские принадлежности								
Карандаш обычный без стерки								
Твердость 3В	1234500001	6,80	8,02	6,12	7,22	5,44	6,42	
Твердость 2В	1234500002	6,50	7,67	5,85	6,90	5,20	6,14	
Твердость В	1234500003	6,20	7,32	5,58	6,58	4,96	5,85	
Твердость НВ	1234500004	6,00	7,08	5,40	6,37	4,80	5,66	
Твердость Н	1234500005	6,20	7,32	5,58	6,58	4,96	5,85	
Твердость 2Н	1234500006	6,50	7,67	5,85	6,90	5,20	6,14	
Твердость 3Н	1234500007	6,70	7,91	6,03	7,12	5,36	6,32	

Рис. 6. Примерный файл электронной таблицы, подлежащий массовому автоматизированному анализу

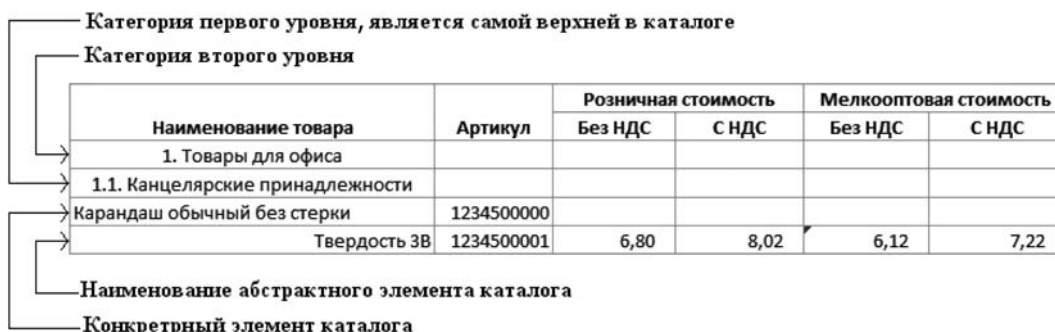


Рис. 7. Пример неразличимых элементов каталога для полностью автоматического анализа

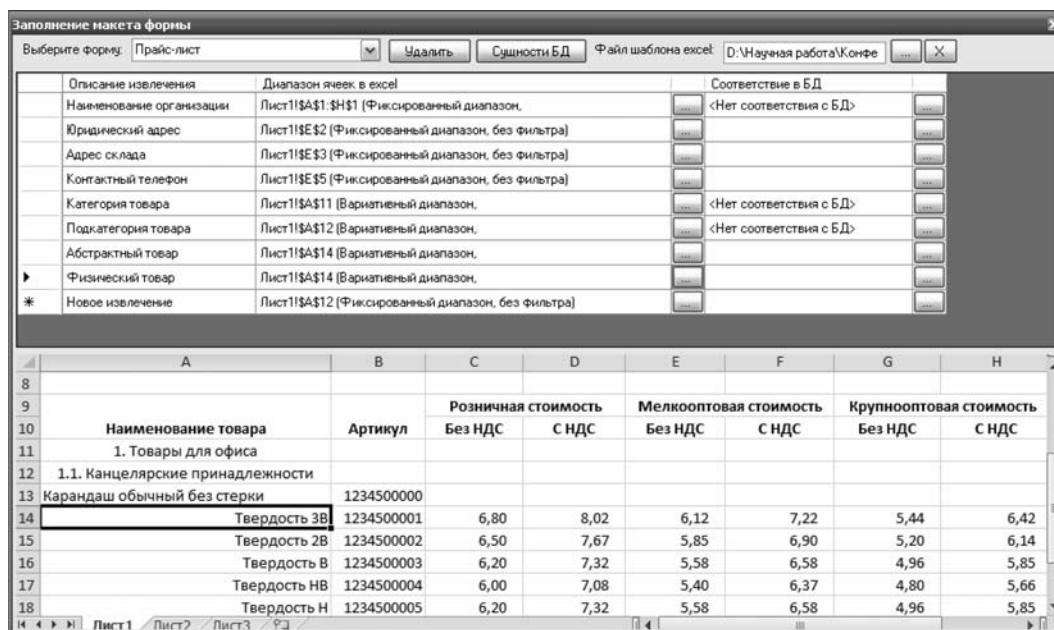


Рис. 8. Приложение создания и модификации схем макетов для групп электронных таблиц со сходной структурой

На рис. 7 показано, что для приведенного примера каталога автоматическое распознавание элементов и создание формальных взаимосвязей — сложная задача, поскольку извлекаемые элементы являются эквивалентными объектами первого рода в трактовке информационных полей, хотя представляют дифференцированные элементы с точки зрения каталога.

Решением задачи может являться мануальное создание оператором схемы для группы электронных таблиц, посредством которых возможно дальнейшее автоматизированное извлечение информационных полей, выполняемое на основании множества критериев, таких как ключевые слова в ячейках, взаимное расположение элементов, фильтрация информационных полей по форматированию и т. д.

Объем критериев для схемы макета может быть существенным и, кроме того, требует постоянного визуального анализа предполагаемой электронной таблицы. Для удобства оператора совмещены графический интерфейс, в котором создаются и модифицируются элементы и целые схемы макетов для групп электронных таблиц со сходной структурой в верхней части, и оригинальный файл в программном обеспечении Microsoft Excel, версия которого выбрана в качестве основной на целевой рабочей станции. Общий вид разработанного приложения показан на рис. 8.

Использование метода расширенной интеграции элементов управления для приведенного графического приложения позволяет существенно упростить работу оператора по созданию и модификации схем макетов для групп электронных таблиц со сходной структурой. Во-первых, организуются прямая и обратная связи между списками критериев, оп-

ределяющих макет шаблона, и группами ячеек, на которые она распространяется, что выражается в виде автоматического выделения и фокусировки ассоциированных элементов в процессе работы.

Во-вторых, осуществляется непосредственное извлечение требуемых объектов первого рода в трактовке информационных полей из оригинального файла электронной таблицы, отраженном в активной иерархической структуре элементов, предоставляемых программным обеспечением Microsoft Excel.

Таким образом, дополнительным эффектом от использования рассмотренной методики является возможность извлечения требуемых элементов первого рода в трактовке информационных полей из системного объекта автоматизации управления целевым приложением вместо необходимости проведения анализа двоичных форматов типовых форматов файлов или осуществления низкоуровневого взаимодействия с областью размещения требуемых информационных элементов.

Список литературы

1. Microsoft software development network // Excel Object Model Overview [Электронный ресурс] / Microsoft Corporation. URL: [http://msdn.microsoft.com/en-us/library/wss56bz7\(v=vs.100\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/wss56bz7(v=vs.100).aspx) (дата обращения 20.09.13).
2. Uwe Keim. Receiving Events from late-bound COM servers [Электронный ресурс] / Code project. URL: <http://www.codeproject.com/Articles/10262/Receiving-Events-from-late-bound-COM-servers> (дата обращения 20.09.13).
3. Власов В. А. Решение задачи адаптивной интеграции приложений с графическим пользовательским интерфейсом средствами ActiveX и WinAPI // VII региональная молодежная научно-практическая конференция Тульского государственного университета "Молодежные инновации". Сб. докл. / Под ред. Е. А. Ядыкина. В 3 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Ч. I. С. 52—54.
4. Platt D. S. Understanding COM+. Microsoft Press, 1999. 300 p.
5. Rector B. E., Newcomer J. M. Win32 programming. Addison-Wesley Longman Publishing Co. Inc. 1997.

Указатель статей, опубликованных в журнале "Информационные технологии" в 2013 году

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

- Гуревич И. М.** Информационные мировые константы. № 9
Кулагин В. П., Цветков В. Я. Геознание: представление и лингвистические аспекты. № 12
Майоров А. А., Цветков В. Я. Геоинформатика как важнейшее направление развития информатики. № 11

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, СЕТИ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

- Агаев Б. С., Пашаев Ф. Г.** Метод оценки качества речи в корпоративных VoIP-сетях. № 8
Аряшев С. И., Корниленко А. В., Зубковская Н. В., Саяпин П. В. Повышение производительности подсистемы памяти методом буферизации данных. № 6
Асратян Р. Э., Лебедев В. Н. Применение технологии прокси-серверов в распределенных системах. № 6
Бобков С. Г., Чибисов П. А. Повышение качества тестирования высокопроизводительных микропроцессоров методами встречного тестирования с анализом функционального тестового покрытия выделенных приложений. № 8
Богатырев В. А., Богатырев С. В., Богатырев А. В. Надежность кластерных вычислительных систем с дублированными связями серверов и устройств хранения. № 2
Иванова Е. М. Сравнительная оценка производительности вычислительных систем. № 8
Карпова И. П. Хранение данных системой автономных устройств. № 5
Колосков В. А., Колоскова Г. П., Павлюченко Д. В., Динь Туан Лонг. Передача сообщений в реконфигурируемой отказоустойчивой многопроцессорной системе. № 10
Механов В. Б., Зинкин С. А., Карамышева Н. С. Формализация управления вычислительными процессами в распределенных системах хранения и обработки данных и знаний. № 1
Наумова В. В. Виртуальные научные среды для обеспечения совместной работы территориально распределенных научных сотрудников. № 4
Опадчий Ю. Ф., Чумакова Е. В. Исследование методов вычислений элементарных математических функций и их реализация на ПЛИС. № 4
Опадчий Ю. Ф., Чумакова Е. В. Методика разработки параллельных вычислительных систем обработки информации в режиме реального времени. № 5
Оцоков Ш. А. Эффективный алгоритм округления в высокоточных вычислениях в модулярной арифметике. № 10
Поливанов Н. С., Речистов Г. С., Абдухаликов А. А., Пентковский В. М. Реализация инструментария для исследования сетевой производительности MPI-приложений на распределенном симуляторе. № 1
Речистов Г. С. Использование полноплатформенного имитационного моделирования суперкомпьютерной системы для оптимизации производительности счетных приложений. № 3
Саак А. Э. Полиномиальные алгоритмы диспетчеризации массивов заявок гиперболического типа. № 3
Саак А. Э. Полиномиальные алгоритмы диспетчеризации массивов заявок параболического типа. № 5
Стемпковский А. Л., Амербаев В. М., Соловьев Р. А. Принципы рекурсивных модулярных вычислений. № 2

- Шерстюков О. Н., Рябенко Е. Ю., Мартыничук С. Л.** Радиомодем LPD-диапазона для задач телеметрии. № 8

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

- Авдошин С. М., Горбатовский М. С., Чернов А. В.** Интеллектуальная платформа для создания ситуационного центра обеспечения безопасности железнодорожной транспортной инфраструктуры. № 1
Батищев В. И., Мошков И. С., Якимов В. Н. Обработка технических документов на основе оценки системной организации знаний. № 10
Большакова Е. И., Лукашевич Н. В., Нокель М. А. Извлечение однословных терминов из текстовых коллекций на основе методов машинного обучения. № 7
Бородащенко А. Ю., Гончаров Д. С. Алгоритм выявления новых событий. № 7
Будников Е. А., Стрижов В. В. Оценивание вероятностей появления строк в коллекции документов. № 4
Букатова И. Л. Развитие эволюционного моделирования в России: концепции, приложения, перспективы. № 9
Грибова В. В., Клещев А. С. Технология разработки интеллектуальных сервисов, ориентированных на декларативные предметные базы знаний. Часть 1. Информационные ресурсы. № 10
Грибова В. В., Клещев А. С. Технология разработки интеллектуальных сервисов, ориентированных на декларативные предметные базы знаний. Часть 2. Решатель задач. Пользовательский интерфейс. № 9
Имамвердиев Я. Н., Сухостат Л. В. Метод оптимизации показателя распознавания в мультибиометрических системах. № 1
Кухаренко Б. Г., Пономарев Д. И. Обнаружение паттернов многомерных временных рядов на основе абстракции данных. № 4
Кухаренко Б. Г., Солнцева М. О. Принцип минимальной длины описания при анализе графов с разреженными матрицами смежности в задачах кластеризации их узлов. № 7
Левин В. И. Логические методы в теории конфликтов. № 10
Перемитина Т. О., Лучкова С. В. Применение программного комплекса "Нечеткая система на основе эволюционной стратегии" для задачи импутирования. № 2
Савченко А. В. Адаптивный алгоритм распознавания речи на основе метода фонетического декодирования слов в задаче голосового управления. № 4
Садьков С. С., Савичева С. В. Распознавание плоских объектов при их наложении. № 2
Сафронов В. В. Упрощенный метод решения задач нечеткого многокритериального ранжирования. № 1

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Лакаев А. С.** Контекстные технологии — новое направление развития информационных технологий анализа текстовой информации. № 12
Филимонов А. Б., Кромин О. А. Механизмы коммуникаций семантических JADE-агентов. № 11

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

- Антонов В. А.** Построение и оптимизация моделей нелинейной функционально-факторной регрессии. № 5
Бронштейн Е. М., Карипова Г. А. Мультиномеклатурная задача транспортной логистики. № 5
Валеева А. Ф., Гончарова Ю. А., Кошечев И. С. Разработка логистической транспортной системы для решения задачи доставки груза различным клиентам. Часть 1. № 12
Васильев А. В. Численно-аналитическое исследование математической модели дробного осциллятора методом S-преобразования. № 11

- Гизатуллин З. М., Гизатуллин Р. М.** Моделирование электромагнитной обстановки на основе теории масштабного эксперимента для задач электромагнитной совместимости и защиты информации. № 4
- Гливенко Е. В., Фомочкина А. С., Прядко С. А.** Решение системы нелинейных алгебраических уравнений с помощью степени отображения. № 7
- Елесина С. И., Логинов А. А., Никифоров М. Б.** Методика оценки качества критериальной функции совмещения изображений. № 3
- Елтаренко Е. А.** Описание предпочтений в многокритериальных задачах с иерархической системой критериев. № 2
- Елтаренко Е. А.** Формирование коллективных предпочтений в многокритериальных задачах. № 12
- Зайцев А. А., Стрижов В. В., Токмакова А. А.** Оценка гиперпараметров регрессионных моделей методом максимального правдоподобия. № 2
- Зак Ю. А.** Методы локальных вариаций в решении задач теории расписаний. № 4
- Зак Ю. А.** Приближенные методы решения Job-Shop-Problem — построение расписаний выполнения n заданий на m машинах. № 9
- Иванова К. Ф.** Интервальная модель задачи теплопроводности в почве. № 2
- Казаков П. В.** Модель динамического изменения размера популяции для генетических алгоритмов многокритериальной оптимизации. № 11
- Карпенко А. П., Митина Е. В., Семенихин А. С.** Когенетический алгоритм Парето-аппроксимации в задаче многокритериальной оптимизации. № 1
- Кухаренко Б. Г., Пономарев Д. И.** Анализ независимых компонент потока векторов для сокращения размерности пространства при кластеризации векторов в целях абстракции данных. № 5
- Максименко-Шейко К. В., Толоч А. В., Шейко Т. И.** Сопряженная задача конвективного теплообмена в топливной касете ТВЭЛов. № 11
- Малеев Е. А., Чепурко В. А.** Корневая оценка плотности распределения по неполным данным. № 4
- Мамедов Р. К., Владимировский Э. И., Мустафаева С. Р.** Аномальная диффузия и ее влияние на хаотические системы. № 3
- Мусихина Е. А., Дарманская Т. А.** Исследование рельефа и построение триангуляционной модели. № 8
- Орехов Э. Ю.** Генерация задач для тестирования эвристических алгоритмов прямоугольного раскроя-упаковки. № 6
- Плесовских И. Б.** Генетический алгоритм оптимизации топологии глобальной вычислительной сети. № 10
- Полицын С. А., Шилов В. В.** Математическая модель процесса выполнения задач при разработке программного обеспечения. № 10
- Потапов Д. А.** Оптимизация смещений и дисперсий оценок параметров математических моделей при обработке сглаженных экспериментальных данных. № 1
- Сологуб Р. А.** Алгоритмы порождения нелинейных регрессионных моделей. № 5
- Струченков В. И.** Математические модели и методы оптимизации в системах проектирования трасс новых железных дорог. № 7
- Струченков В. И.** Математические модели и методы оптимизации в системах проектирования трасс автомобильных дорог. № 8
- Струченков В. И.** О различных подходах к автоматизации проектирования трасс линейных сооружений. № 12
- Субботин С. А.** Выделение обучающих выборок для построения диагностических моделей на основе методов вычислительного интеллекта. № 12
- Третьяков В. М.** Элементы теории паттернов для моделирования изделий машиностроения. № 9
- Федосов В. В., Федосова А. В.** Стохастический поиск защитных нормативов объектов (зон), размещенных на общей территории с группой источников промышленных выбросов. № 11
- Чеканин В. А., Чеканин А. В.** Алгоритм решения задач ортогональной упаковки объектов на основе мультиметодной технологии. № 7
- Четырбоцкий А. Н.** Приложение прямого метода решения системы линейных уравнений для численного моделирования сферического течения Куэтта несжимаемой жидкости в среде MATLAB. № 3
- Четырбоцкий А. Н.** Статистическая интерпретация оценок параметров радиально-базисных функций. № 7
- Четырбоцкий А. Н.** Численное 2D-моделирование теплового потока в верхней мантии Земли. № 12
- Чувашева Е. С., Чувашев С. Н.** Выбор рациональных характеристик высокоскоростных летательных аппаратов разных масштабов на основе комплексной математической модели. № 8
- Юлюгин Е. А., Речистов Г. С., Плоткин А. Л.** Моделирование нагрузки на сетевое оборудование. Изучение влияния топологии сети на производительность приложений молекулярной динамики. № 12

СИСТЕМЫ

АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- Бульонков М. А., Филаткина Н. Н.** Ситуационный анализ в системе транспортного прогнозирования МИКС-ПРОСТОР. № 8
- Гридин В. Н., Анисимов В. И., Ларистов А. И., Аль-Шахи Мо-хаммед.** Модель предметной области для базы данных схемных компонентов схемотехнической САПР. № 9
- Евсеев И. А.** Автоматизация формирования структуры трансформаторных элементов сложной конфигурации на основе теории графов. № 4
- Конников И. А.** Математическое моделирование перекрестной помехи в САПР. № 4
- Паршикова Е. А.** Возможные подходы к автоматизации проектирования систем поддержки принятия управленческих решений. № 8
- Стенников В. А., Барахтенко Е. А., Соколов Д. В.** Применение онтологий при реализации программного комплекса для решения задач оптимального проектирования теплоснабжающих систем. № 3
- Черемисинова Л. Д., Кириенко Н. А.** Синтез многоуровневых логических схем с учетом энергопотребления. № 3

КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Архипов О. П., Зыкова З. П.** Коррекция детализации представлений RGB-изображений на периферийных устройствах ПЭВМ. № 2
- Бимаков В. А., Касимов Т. Р.** Использование воксельных вычислителей для скоростного преобразования 2D- и 3D-изображений высокого разрешения. № 3
- Бобков В. А., Роньшин Ю. И., Машенцев В. Ю., Кудряшов А. П.** Навигация автономного подводного аппарата по видеопотоку. № 3
- Гулаков В. К., Огурцов С. Н., Трубаков А. О.** Сегментация пейзажных изображений. № 1
- Зуев А. С.** О возможностях реализации четырехмерных графических интерфейсов. № 4
- Протасов С. И., Крыловецкий А. А., Кургалин С. Д.** Подход к решению задачи ректификации стереоизображений по сцене без калибровки камер. № 2
- Шарабайко М. П., Марков Н. Г.** Исследование эффективности кодирования цветных изображений с помощью фракталов. № 1

Яшин К. Д., Лосик Г. В., Ткаченко В. В., Осипович В. С., Скаскевич О. А. Метод противопоставления систем искусственного интеллекта и виртуальной реальности в преподавании когнитивной графики в университете. № 4

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

Гайнуллин Р. Ф., Брагин Д. Г. Анализатор диаграммных языков для Microsoft Visio. № 6

Зуев А. С. О развитии среды виртуального рабочего стола. № 2

Клейменова Е. М., Скобелев П. О., Ларюхин В. Б., Майоров И. В., Косов Д. С., Симонова Е. В., Царев А. В., Феоктистов А. Л., Полончук Е. В. Интеллектуальная система "Smart Projects" для оперативного управления ресурсами в проектах НИР и ОКР в реальном времени. № 6

Морылев Р. И., Шаповалов В. Н., Штейнберг Б. Я. Символьный анализ в диалоговом распараллеливании программ. № 2

Петров А. А., Калайда В. Т. Платформа для создания единой вычислительной среды в локальной сети. № 7

Поляков С. Д. Применение стандартизованных моделей качества при разработке требований к компьютерным системам. № 6

Соловьев Б. А., Калайда В. Т. Технология проектирования, создания и администрирования распределенных вычислительных систем, основанная на модели компонентных объектов. № 7

БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОРМАЦИИ

Алешников С. И., Алешникова М. В., Горбачёв А. А. Протокол доверенного шифрования на основе модифицированного алгоритма вычисления спаривания Вейля на алгебраических кривых для облачных вычислений. № 9

Беляева Е. А. Сравнительная оценка аппаратно-программных модулей доверенной загрузки на основе классификации их функциональных возможностей. № 11

Боровский А. С., Тарасов А. Д. Автоматизированное проектирование систем физической защиты на основе функциональной и структурно-логической потоковых моделей. № 6

Востриков А. А. О матрицах Адамара — Мерсенна и маскировании изображений. № 11

Еременко А. В., Сулавко А. Е. Исследование алгоритма генерации криптографических ключей из биометрической информации пользователей компьютерных систем. № 11

Моисеев В. С., Тутубалин П. И. Вероятностная динамическая модель функционирования программных средств активной защиты мобильных распределенных АСУ. № 6

Новикова Е. С., Котенко И. В. Проектирование компонента визуализации для автоматизированной системы управления информационной безопасностью. № 9

Червяков Н. И., Афонин М. С., Бабенко М. Г., Ляхов П. А. Аналитический обзор методов и алгоритмов распараллеливания арифметических операций с точками эллиптической кривой на основе нейросетевого подхода. № 2

БАЗЫ ДАННЫХ

Барский А. Б., Нгуен Ван Лой. Оценка среднего времени выполнения запроса к многосерверной базе данных с циркулирующими сегментами. № 3

Власов С. В. Сущностно-ориентированный подход к разработке информационного хранилища (в задачах транспорта газа). № 3

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СИСТЕМЫ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Берикова Л. Р. Вопросы оптимизации трансформации сигналов цветности при слиянии спутниковых черно-белых и цветных изображений. № 6

Бекирова Л. Р. Вопросы минимизации влияния изменчивости атмосферного аэрозоля на информативность спутниковых мультиспектральных изображений. № 8

Беляков С. Л., Белякова М. Л., Савельева М. Н. Прецедентный анализ образов в интеллектуальных геоинформационных системах. № 7

Бердников С. В., Архипова О. Е., Лычагина Ю. М. Концепция комплексной информационной справочной системы для управления морским природопользованием и освоением прибрежных зон Баренцева и Белого морей. № 6

Иванова К. Ф. Оценка прогнозной модели долгосрочного температурного распределения в деятельном слое почвы. № 6

Солодовниченко М. А., Замятин А. В. Алгоритм распространения лесного пожара с использованием модели Ротермела и клеточных автоматов. № 8

КОДИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

Бекирова Л. Р. Вопросы оптимизации трансформации сигналов цветности при слиянии спутниковых черно-белых и цветных изображений. № 5

Дворников С. В., Дворников С. С., Борисов В. В., Бабенко Д. С., Москалец А. Г., Устинов А. А., Чихонадских А. П. Демодуляция сигналов с относительной фазовой манипуляцией с адаптивным порогом принятия решения. № 9

Дворников С. В., Дворников С. С., Спиринов А. М. Синтез модулированных сигналов на основе вейвлет-функций. № 12

Дворников С. В., Степнянин Д. В., Дворников А. С., Букарева А. П. Формирование векторов признаков сигналов из вейвлет-коэффициентов их фрейм-преобразований. № 5

Домунян А. А. Метод распознавания жестов руки на основе позиционного расстояния. № 11

Козловский П. А., Старков С. О., Тельных А. А. Поиск нечетких дубликатов на основе бинарных шаблонов. № 9

Пехтерев В. В., Вишняков С. В., Чобану М. К. Адаптивная триангуляция и сжатие изображений. № 5

Чуднов А. М., Овчинников А. В. Оптимизация порога стирания при приеме псевдослучайных сигналов. № 9

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

Залещанский Б. Д., Свиридов А. П., Шалобина О. А., Шалобина Е. А. Вероятностно-статистические стратегии обеспечения качества подготовки персонала социотехнических систем. № 8

Норенков И. П. Алгоритм упорядочения модулей в синтезируемых учебных пособиях. № 5

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ

Абдуллаева Г. Г., Курбанова Н. Г., Мирзазаде И. Х. Интеллектуально-информационная система дифференциальной диагностики отравлений токсическими веществами (на примере отравлений угарным газом). № 10

Грибова В. В., Заморова П. А. Использование методов искусственного интеллекта при разработке медицинских диагностических компьютерных тренажеров. № 4

Садыхов С. С., Буланова Ю. А., Захарова Е. А. Алгоритм выделения области кисты на малоконтрастных маммограммах. № 8

Тараканов С. А., Кузнецов В. И., Рыжаков Н. И., Рассадина А. А., Когаленок В. Н. Алгоритмы регулирования информационных потоков между врачом и пациентом при дистанционной диагностике в режиме реального времени. № 7

Туровский Я. А., Кургалин С. Д., Семёнов А. Г. Исследование динамики максимумов локальных вейвлет-спектров вызванных зрительных потенциалов головного мозга. № 10

Яшин К. Д., Мезяная К. Н., Заливако С. С., Корневский К. М. Влияние виртуального мира на личность студента. № 10

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ФИНАНСОВО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Грушин В. А., Архипова Я. А. Динамика экономического развития стран мира по фондовым индексам. № 5

Коновалов О. А., Малыков К. А., Сербулов Ю. С. Обобщенная классификация ресурсов в технологических проектах. № 10

Павлов К. В. Алгоритм выбора многоуровневых моделей в задаче банковского кредитного скоринга. № 2

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Агаев Ф. Г., Асадов Х. Г., Халафов Р. В. Метод оптимальной оценки степени биоразнообразия в экологических системах. № 6

Антонов А. В., Сальников Н. Л., Хромова М. О., Чепурко В. А. Об одной оценке показателей надежности восстанавливаемых технических систем. № 12

Васин Н. Н., Куринский В. Ю. Расширение функциональных возможностей систем видеонаблюдения. № 6

ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ И СИСТЕМЫ

Власов В. А. Метод расширенной интеграции элементов управления в графических приложениях. № 12

ДИСКУССИОННЫЙ КЛУБ

Воеводин В. П. Структура понятия надежности вычислительной системы. № 9

Лисин А. И. К вопросу о природе информации. № 10

Журнал в журнале

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Артеменков С. Л. Иерархия процессов опознания в "перцептроне" Миракяна. № 3

Барский А. Б., Нгуен Ван Лой. Информационно-справочная система "Многосерверная база данных с циркулирующими сегментами" на логической нейронной сети. № 9

Галушкин А. И. Нейросетевые технологии в перспективных суперЭВМ. Концепция развития высокопроизводительных вычислений на базе супернейрокомпьютеров (2012—2020 гг.). № 9

Горбатков С. А., Белолипецев И. И., Солнцев А. М. О состоятельности процедур регуляризации нейросетевых моделей налогового и финансового контроля. № 11

Горбатков С. А., Рашитова О. Б. Моделирование налоговых управленческих решений на основе нейронных сетей Кохонена. № 5

Горбаченко В. И., Жуков М. В. Обучение сети радиальных базисных функций методом доверительных областей для решения уравнения Пуассона. № 9

Гриняк В. М., Девятисильный А. С. Нейронечеткая обучаемая система распознавания воздушных объектов. № 11

Данилин С. Н., Макаров М. В., Щаников С. А. Комплексный показатель качества работы нейронных сетей. № 5

Данилин С. Н., Пантелеев С. В. Алгоритм контроля отказоустойчивости нейронных сетей. № 1

Доленко С. А., Буриков С. А., Доленко Т. А., Персианцев И. Г., Сабиров А. Р., Фадеев В. В. Нейросетевое решение обратной задачи лазерной спектроскопии по дистанционному определению температуры и солености природных вод с учетом влияния растворенного органического вещества. № 1

Дорогов А. Ю., Абатуров В. С., Раков И. В. PMML-модели быстрых нейронных сетей. № 3

Кретинин А. В., Бураков А. А., Кирпичев М. И. Профилирование лопасти центробежного насоса с использованием нейросетевого алгоритма решения уравнений гидродинамики. № 1

Мельников И. И., Демиденков К. А., Емельянов И. А., Евсенок И. А. Детектор движения на основе импульсных нейронных сетей. № 7

Осипов В. Ю. Метод управления синапсами в рекуррентной нейронной сети. № 7

Пекунов В. В. О классификации лиц методом голосования с нейросетевым арбитром. Распараллеливание вычислений на многоядерных видеокартах. № 3

Рындин А. А., Ульев В. П. Принципы функционирования и оптимизации нейронных сетей прямого распространения большой размерности. № 7

Юдин Д. А., Магергут В. З. Сегментация изображений процесса обжига с применением текстурного анализа на основе самоорганизующихся карт. № 5

ИНФОРМАЦИЯ

Встречи в Китае. № 6

Письмо в редакцию. № 7

Указатель приложений к журналу "Информационные технологии" в 2013 году

Актуальные вопросы автоматизированного проектирования: моделирование, оптимизация, обработка информации. № 12

Бетелин В. Б., Галатенко В. А., Костюхин К. А. Основные понятия контролируемого выполнения сложных систем. № 3

Бородкин А. А., Некрасов И. В., Толчеев В. О. Методы повышения быстродействия непараметрических классификаторов в задачах обработки и анализа библиографических текстовых документов. № 11

Гринченко С. Н., Шапова Ю. Л. Информационные технологии в истории Человечества. № 8

Колесников А. А., Веселов Г. Е., Колесникова С. И., Колесников Ал. А., Дзюба Ю. Н. Синерго-кибернетический подход к созданию хаосодинамических систем обработки и защиты информации. № 10

Крюкова О. П., Маркарова Т. С., Харламов А. А. Электронные библиотеки в образовании. № 4

Кухаренко Б. Г. Алгоритмы анализа компонент гиперспектральных изображений. № 6

Лобанов В. В. Современные подходы к построению интеллектуальных телеметрических систем сбора и обработки распределенной пространственно-временной информации. № 5

Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Ситников М. С. Устойчивость интеллектуальных систем автоматического управления. № 2

Саак А. Э. Полиномиальные алгоритмы распределения ресурсов в Grid-системах на основе квадратичной типизации массивов заявок. № 7

Скобелев П. О. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития. № 1

Фурсов В. А. Адаптивная идентификация по малому числу наблюдений. № 9

CONTENTS

Kulagin V. P., Tsvetkov V. Ya. *Geoknowledge: Presentation and Linguistic Aspects* 2

The article analyzes the new concept in Geoinformatics — geoknowledge. The article describes the main types of geoknowledge. The article reveals the content geoknowledge. The article describes the difference between the geoinformation and geographic knowledge. The article describes the relationship and differences between spatial, declarative and procedural knowledge. The article describes the georeference as the basis of receiving and presenting geoknowledge. The connection between spatial relations and geoknowledge. The article describes the linguistic peculiarities of spatial relations. The article describes the spatial information of the situation. The paper describes the graphic model information interaction of spatial objects.

Keywords: geoinformatics, geoknowledge, spatial awareness, knowledge, spatial relationships, georeferentsiya, linguistics spatial relations

Lakaev A. S. *Context Technologies — a New Direction of Development of Text Analysis Information Technologies* 10

A new intellectual technology for analyzing an unstructured text is given. The analyzed text is supposed to deal with a multidimensional problem of any nature (research and development, industries, political affairs). The proposed technology is contextually dependent and based on searching in the text semantic structures which can be quickly perceived and interpreted by the user. It can be useful both for big corporations and individual users.

Keywords: intellectual technology unstructured text, context, analysis, semantic image, interpretation, user's individual opportunities

Chetyrbotsky A. N. *2D-Numerical Modeling of Heat Flow in the Earth's Upper Mantle* 17

As part of the Oberbeck — Boussinesq considered 2D natural convection in the upper mantle of the Earth. On the lithosphere-asthenosphere boundary accepted assumption that the dynamics of heat is determined by: a stream with its neighbor to the boundary layer of the asthenosphere dissipation of heat along the border and the costs of heat on the melting of the lithosphere. The numerical solution of the governing equations is performed in the stream function — vorticity. We present an iterative scheme to solve them. The issues of program implementation unit of the numerical simulation. It is shown that under these boundary conditions in this system is formed by quasi-periodic oscillation mode of heat.

Keywords: heat flow, the mantle of the Earth, numerical modeling, computational experiments

Valeeva A. F., Goncharova Yu. A., Koshcheev I. S. *The Development of the Logistic Transport System* 23

In this article the prototype of the logistic transport system for solving the problem of goods delivery to customers (3L-EVRP, Three-Dimensional Extended Vehicle Routing Problem) is considered. Mathematical model for 3L-EVRP problem and the algorithms of the optimization kernel of system such as a population based ant colony optimization algorithm for looking for rational routes and evolutionary algorithm (1 + 1)-EA3D for looking for rational packing of contents with cuboid and cylindrical forms, taking into account required restriction (the consideration of the center of gravity, palletization etc) are presented. Some numerical experiments on random generated data, taking into account such restrictions as vehicle capacity, time windows, split delivery, delivery period, multi depot and so on, and tested examples, taken from International OR-library tests, are resulted.

Keywords: routing, goods displacement in transportation means, transportation logistics, logistic transport system, population based ant colony optimization algorithm, evolution algorithm

Eltarenko E. A. *Construction of Group Preferences in Multicriteria Problems* 28

In practice experts are involved in the solution of multicriteria problems. The problem of construction of group functions of preference on the basis of personal preferences of experts is solved. By results of poll of experts components of group function of preference (GFP) are defined. The problem of a statistical assessment of reliability of received GFP is considered.

Keywords: multicriteria problems, the description of preferences, expert methods, group preferences

Subbotin S. A. *The Trainig Sample Extraction for Diagnostic Model Building on the Basis of Computational Intelligence Methods* 36

The problem of automation of training sample formation for building of diagnostic models by precedents has been solved. The method of training sample formation based on the mapping of the original sample to one-dimensional axis is firstly proposed. It preserves the topological properties of the original sample in the generated sub-sample which are important for the for the futther analysis.

Keywords: sample, exemplar, diagnostics, recognition

Struchenkov V. I. *On Different Approaches to Computer-Aided Design Routes of Linear Structures* 41

Under study are various approaches to the creation of computer programs for designing the routes of line structures. The limitations of interactive design and of local approach are discussed. An integrated approach to solving design problems and CAD with feedback are recommended. The problem is solved in some stages in interrelation with other design problems.

Keywords: route, horizontal and vertical alignment, nonlinear programming, objective function, gradient

Yulyugin E. A., Rechistov G. S., Plotkin A. L. *Simulation of Load on Network Equipment. Study of Influence of Network Topology on Application Performance Molecular Dynamics* 48

In this paper analytical and simulation methods of study of the influence of network topology to the performance of molecular dynamics applications are described. The proposed method is a simulation of the application in a series of experiments to test accuracy of the results. The approach is applied and tested for the application of molecular dynamics Gromacs. The work was performed under a grant issued by Government of Russia order No. 220 of 09.04.2010.

Keywords: Simics, network performance, tracing, cluster, Wireshark, simulation

Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Spirin A. M. *Syntheses of Manipulated Signals on the Base of Wavelet-Functions*. 52

The results of the analytical studies and data of computers experiment of on the motivation of the possibility of the using wavelet-function for the syntheses of antinoise signals are introduced. Approach to choice of the type wavelet-function with provision for her spectral features is offered. It is shown main stages of the algorithm, realizing designed scientific approach.

Keywords: wavelet-function, the syntheses of signals wavelet modulation

Antonov A. V., Salnikov N. L., Khromova M. O., Chepurko V. A. *Evaluation of Reliability Characteristics of Restored Object*. 56

In this article, we propose a new method for estimating the reliability of recoverable objects. The method is based on the kernel estimation failure intensity ungrouped and grouped flow failures. The second stage is estimated by the renewal equation of density reduction. Given simulation and practical examples of the construction estimate.

Keywords: renewal equation, renewal function, failure intensity, kernel estimate, the smoothing parameter

Vlasov V. A. *Method of Enhanced Integration of the Control in a Graphics Application*. 62

Considered the method of organization of the automated application management with a graphical interface that provides advanced integration they provide visual and software elements in the host environment. Feature of the method is to achieve a balance between the degree of automation of the target software controls, and algorithmic complexity and versatility of solutions.

Keywords: automation applications, application integration, image control, graphical interface, technologies ActiveX, WinAPI

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала **(499) 269-5510**

E-mail: it@novtex.ru

Дизайнер *Т.Н. Погорелова*. Технический редактор *Е.В. Конова*.

Корректор *Т.В. Пчелкина*.

Сдано в набор 07.10.2013. Подписано в печать 20.11.2013. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ ИТ1213. Цена договорная.

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

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

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.