

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ХАРЬКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ ИМ. М. К. ЯНГЕЛЯ

# ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

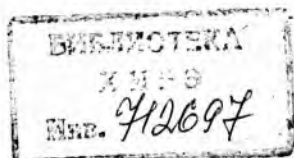
---

Республиканский  
межведомственный  
научно-технический  
сборник

Основан в 1968 г.

ВЫПУСК 44

2001



Харьков

Издательство «Основа» при Харьковском  
государственном университете  
1990

В сборнике представлены результаты научных исследований в области формального описания механизмов человеческого интеллекта. Рассмотрены методы моделирования и математические средства психологической бионики. Освещены результаты бионических исследований. Предложены новые подходы к построению моделей языка и речи, диалоговых систем, структур знаний и систем баз данных.

Для научных работников и специалистов.

Редакционная коллегия: Ю. П. Шабанов-Кушнаренко (отв. ред.), М. Ф. Бондаренко (зам. отв. ред.), Г. Г. Четвериков (отв. секр.), В. И. Васильев, Т. К. Винцюк, А. Д. Закревский, К. А. Иванов-Муромский, Р. Г. Котов, Э. М. Куссиль, Б. М. Лобанов, В. А. Ловицкий, Г. А. Миронов, Л. Л. Нелюбин, А. Ф. Осыка, В. И. Перебийнос, Е. П. Путятин, И. Б. Сироджа, В. Я. Сердюченко, Г. Д. Фролов, В. Т. Чернов

Адрес редакционной коллегии: 310726 Харьков, пр. Ленина, 14. Институт радиоэлектроники, тел. 40-93-66

Редакция литературы по естественным наукам и филологии  
Зав. редакцией *Е. П. Иващенко*

## СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

### ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

Выпуск 44

Редактор *О. И. Григорьян*  
Художественный редактор *Т. П. Короленко*  
Технический редактор *Л. Т. Ена*  
Корректор *Л. А. Емельянова*

ИБ № 13191

Сдано в набор 24.01.90. Подписано в печать 27.02.90. БЦ 15666. Формат 60×90/16. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 9  
Усл. кр.-отт. 9,25. Уч.-изд. л. 10. Тираж 700 экз. Изд. № 1841. Зак. 112.  
Цена 1 р. 40 к.

Издательство «Основа» при Харьковском государственном университете.  
310003 Харьков, ул. Университетская, 16.

Харьковская городская типография № 16.  
310003 Харьков, ул. Университетская, 16.

П 1402080000—017  
М226(04)—90 42—90

© Харьковский институт  
радиоэлектроники, 1990

**О ПРОБЛЕМАХ ТЕОРИИ ИНТЕЛЛЕКТА**

Поскольку вычислительная техника становится основой автоматизации умственного труда, начинают говорить о появлении искусственного интеллекта. Но успехи интеллектуализации вычислительной техники невелики, особенно если сравнивать достигнутое с ожиданиями и прогнозами 50—60-х гг. Автоматический перевод в хорошем виде так и не получился. Распознавание образов увязает в огромных трудностях. Как достичь машинного понимания речи — никто не знает. Естественный язык машина не освоила. Общение с ЭВМ для человека по-прежнему остается неудобным и нелегким делом. Приходится признать, что термин «искусственный интеллект» выражает пока лишь систематически несбывающиеся ожидания.

Характеристика ЭВМ как «ученых идиотов», данная Шенноном более 30 лет назад, остается в силе и сегодня. Основные проблемы, перед которыми разработчики искусственного интеллекта остановились в 50-е годы, до сих пор не преодолены. Машины пока не мыслят, и нет надежд на то, что у них в обозримом будущем появятся проблески разума, если события и дальше будут развиваться подобным образом. Ощущение такое, что техника искусственного интеллекта стоит перед неприступной стеной и обход ее совершенно невозможен. И дело здесь не в слабости технических возможностей современной вычислительной техники: уже сейчас наиболее крупные автоматически действующие информационные системы превосходят человеческий мозг по производительности и объему памяти. Причины трудностей в другом — слишком уж несовершенна функциональная организация существующих систем искусственного интеллекта.

Можно ли надеяться на кардинальные сдвиги в области искусственного интеллекта? История развития науки свидетельствует о том, что качественным сдвигам после длительного периода застоя всегда предшествует изменение точки зрения на предмет исследования. Думается, что и в области искусственного интеллекта прорыв может быть обеспечен только при новом подходе к проблеме. Такой новый подход, по нашему мнению, может дать бионика. До сих пор умственные способности машин развивались почти исключительно за счет инженерно-изобретательской деятельности. Практически все достижения последних десятилетий здесь получены за счет новых технических решений. Разработчики автоматических информационных систем лишь в крайне незначительной степени используют уже существующие в природе механизмы и явления интеллектуальной деятельности. Однако при создавшемся положении недостаточно опираться только на изобретательство, инженерную деятельность при создании систем искусственного интеллекта.

Надо опираться также и на те решения, которые накопила природа. Пора уже осваивать патенты природы, изучать закономерности естественного интеллекта. Ведь все те умственные способности, которые желательно привить машине, уже имеются у человека, причем в достаточно развитом виде, и неразумно пренебрегать этой подсказкой природы. Это тем более необходимо, что никакой другой интеллект, кроме человеческого, пока науке недоступен. Можно с большой степенью уверенности утверждать, что нет двух различных видов интеллекта — машинного и человеческого, законы интеллекта одинаковы вне зависимости от того, кому они принадлежат: людям, машинам или инопланетянам. Если и в самом деле машинам суждено поумнеть, то они обязательно будут мыслить по тем же законам, по которым мыслит человек.

Многого бы достигла ядерная энергетика, если б она не опиралась на открытия физики? И космонавтика — если бы она не основывалась на достижениях механики и других естественных наук? Все преуспевающие области техники опираются на изучение соответствующих законов природы. И только одна техника искусственного интеллекта этого не делает. И на этом сильно проигрывает. До тех пор, пока положение кардинально не изменится и наука не обратится к серьезным и систематическим исследованиям человеческого интеллекта, дело создания искусственного интеллекта вряд ли сдвинется с мертвой точки. Такие исследования, конечно, потребуют огромных средств и усилий, однако в других областях науки и техники охотно идут на это и находят очень выгодным. Все же лучше ценой больших усилий и затрат медленно двигаться вперед, чем топтаться на одном месте.

Наука, изучающая механизмы естественного интеллекта с целью использования добытых знаний для создания систем искусственного интеллекта, называется *теорией интеллекта* [1, с. 3, 4]. Один из пионеров в области искусственного интеллекта Нильсон писал: «Если бы такую теорию интеллекта можно было создать, то с ее помощью можно было бы направленно вести разработку интеллектуальных машин» [2, с. 12]. Теория интеллекта — это не техника, это — область естествознания, физики. Имеется физический объект — человек с его интеллектом. Требуется математически описать законы, управляющие интеллектуальной деятельностью человека. Требование математического оформления результатов исследований для теории интеллекта обязательно. Дело в том, что чисто словесные неформализованные описания умственных способностей человека, которые дает психологическая наука, нельзя передать машине; их понимает человек, но они недоступны машине. Машина может усвоить только полностью формализованные знания.

Как достичь прогресса в разработке теории интеллекта, в каких направлениях ее развивать? Чтобы ответить на эти вопросы, полезно учесть опыт физики. Первое, что бросается в глаза, — это то, что физика пользуется хорошо развитым математическим аппаратом. Открываемые в физике законы описываются в виде ма-

тематических уравнений, которые задают те или иные отношения. Математики также разрабатывают методы решения уравнений. Решая уравнения при заданных начальных условиях относительно тех или иных переменных, инженеры получают функции, описывающие те или иные физические процессы. Аналогично этому, в теории интеллекта можно ставить задачу разработки специального математического аппарата уравнений для описания законов интеллекта и аппарата функций для описания интеллектуальной деятельности.

Представляется, что для теории интеллекта прежде всего необходим математический аппарат. Может быть, для нее подойдет математический аппарат, используемый в физике? А там используется непрерывная или континуальная математика. Для каких-то периферийных задач теории интеллекта континуальная математика наверняка подойдет. Например, на языке интегрального исчисления удобно описывать работу органов чувств [3, с. 114]. Однако ясно, что главной опорой для теории интеллекта такой аппарат стать не может, интеллект — инструмент универсальный, и для своего формального описания он, естественно, нуждается в универсальном математическом аппарате. Аппарат же вещественных функций, дифференциального и интегрального исчисления, созданный для нужд физики, весьма специален, он явно не обладает свойством универсальности. Но может быть, подойдет аппарат дискретной или счетной математики, разработанный теорией алгоритмов и автоматов? Однако этот математический аппарат тоже не универсален, о чем свидетельствует теорема Геделя о неполноте. Об эту теорему в свое время разбилась программа Гильберта создания теории доказательств на базе счетной математики. Теорию доказательств Гильберт понимал как науку о правилах, согласно которым действует наше мышление, т. е. по существу как теорию интеллекта.

Означает ли это, что универсальный математический аппарат, необходимый для теории интеллекта, вообще невозможен? Гильберт с таким выводом не соглашается. Он пишет: «...возникшее на определенное время мнение, будто из результатов Геделя следует неосуществимость моей теории доказательств, является заблуждением. Этот результат на самом деле показывает только то, что ... финитная точка зрения должна быть использована некоторым более сильным образом ...» [4, с. 19]. В этом высказывании мы усматриваем призыв к переходу от счетной математики к конечной. В другом месте Гильберт отмечает: «Общий вывод таков: бесконечное нигде не реализуется. Его нет в природе, и оно недопустимо как основа нашего разумного мышления, — здесь мы имеем замечательную гармонию между бытием и мышлением» [5, с. 364].

Теорема Геделя о неполноте на конечную математику не распространяется, поэтому последняя свободна от ограничений, которым подвержена счетная математика. Отсюда вытекает вывод: именно конечная математика представляет из себя тот единствен-

но возможный универсальный язык формального описания, который так необходим теории интеллекта. Сказанное вовсе не означает, что континуальная или счетная математика неприменима в теории интеллекта. Она применима, но не в качестве универсального средства формального описания интеллектуальной деятельности человека. Так, с помощью интегралов можно описать преобразование зрительной системой человека светового излучения в цветное ощущение. Однако это описание будет не вполне точным, поскольку в нем не учитывается факт конечной чувствительности органа зрения. Чтобы его учесть, необходим переход на язык конечной математики.

С прикладной точки зрения язык конечной математики тоже представляется вполне приемлемым, так как любые системы искусственного интеллекта имеют конечную сложность, и на них можно практически воспроизвести лишь те интеллектуальные процессы, которые допускают математическое описание на языке конечной математики. Итак, остановимся на конечной математике. Но в виде какой конкретной алгебраической системы она должна использоваться в теории интеллекта? Здесь вывод тоже получается однозначным: нужна алгебра конечных предикатов. На языке алгебры конечных предикатов можно записать любое конечное отношение и любую конечную функцию. Выражение произвольной конечной функции в явном виде, как подчеркивается в этой книге, также достигается после некоторого расширения аппарата алгебры конечных предикатов. Это означает, что на языке алгебры конечных предикатов можно выразить любой закон интеллекта и любую интеллектуальную деятельность, реализуемые на ЭВМ.

Все то, что можно выразить на языке алгебры конечных предикатов, можно также практически воспроизвести на ЭВМ. И наоборот, все то, что можно реализовать на ЭВМ, можно также записать на языке алгебры конечных предикатов. Таким образом, существует точное соответствие между описательными возможностями алгебры конечных предикатов и возможностями вычислительных машин фактически реализовать описания этой алгебры. Вывод о том, что для теории интеллекта нужна именно алгебра конечных предикатов, подкрепляется еще и тем, что к алгебре конечных предикатов ведут буквально все пути. Так, если язык теории графов дополнить формульным аппаратом, то в результате получаем алгебру конечных предикатов. Если алгебру логики обобщить и перейти от двоичных переменных к буквенным, — тоже получаем алгебру конечных предикатов. Если многозначную логику дополнить языком для записи отношений, — снова приходим к алгебре конечных предикатов. Наконец, если взять конечный фрагмент логики предикатов и алгебраизировать его, то и в этом случае приходим к той же алгебре конечных предикатов.

Очень важно то, что алгебра конечных предикатов служит для теории интеллекта не только формальным языком описания законов интеллекта и интеллектуальной деятельности человека. Ее роль оказывается гораздо более значительной. Можно сказать, что ал-

гебра конечных предикатов в действии — это и есть интеллект. Структуры алгебры конечных предикатов выражают самую суть интеллектуальных процессов и явлений, они допускают непосредственную интерпретацию в психологических терминах. Так, формулы алгебры конечных предикатов можно непосредственно интерпретировать как фразы естественного языка; предикаты, обозначаемые формулами, — как мысли человека; операции над предикатами — как мыслительную деятельность человека. Уравнения алгебры конечных предикатов интерпретируются как законы мышления. Минимизация формул непосредственно связывается с лаконизмом речи. Декомпозиция формул соответствует расчленению текста на отдельные предложения в процессе речи.

Предикаты различных порядков соответствуют понятиям человека различного уровня абстрактности. Решение уравнений алгебры конечных предикатов соответствует мыслительной деятельности человека. Благодаря наличию такой широкой содержательной интерпретации, даже чисто математическая разработка алгебры конечных предикатов позволяет вместе с тем продвигать вперед разработку самой теории интеллекта. Минимизация, декомпозиция, решение уравнений, методы тождественного преобразования формул — это также вопросы, которые должны разрабатываться в первую очередь. В этой области уже сейчас имеются существенные результаты и проводятся дальнейшие исследования.

Другая важная проблема теории интеллекта, которая также поддается сравнительно легкой и быстрой разработке, заключается в формальном описании математических понятий, используемых людьми в своей интеллектуальной деятельности. Любое математическое понятие, любой математический знак, будучи переведены на язык алгебры конечных предикатов, немедленно становятся доступными для систем искусственного интеллекта. Объем работ в этой области предстоит выполнить очень большой. Оказывается, что даже самые простые понятия математики, такие как принадлежность элемента множеству, равенство и включение множеств, декартово произведение множеств, исчерпывающим образом еще не описаны на языке конечной математики. Работы в этой области уже начаты и получены первые результаты. Описание же таких математических объектов, как непрерывность, интеграл, производная, т. е. понятий континуальной математики, практически еще и не начиналось. Выражение понятий континуальной и счетной математики на языке конечной математики вполне осуществимо. О возможности этого в свое время писал еще Гильберт [5, с. 356]. В этой области также предстоит выполнить огромный объем работ. Когда все эти работы будут доведены до конца, вычислительные системы смогут оперировать математическими понятиями столь же легко и свободно, как это делает человек.

Алгебра конечных предикатов приносит свои плоды и в такой, казалось бы, устоявшейся области, как синтез схем ЭВМ [6]. До сих пор математической основой такого синтеза служила двоичная алгебра логики. Оказывается, синтез схем можно вести так-

же и на базе буквенной алгебры конечных предикатов. При этом появляются ценные дополнительные возможности. Схемы получаются сильно распараллеленными, их структура весьма напоминает строение нейронных ансамблей, которые нейрофизиологи находят в мозге животных и человека. Возникает множество интересных задач, связанных с разработкой методов синтеза схем на базе алгебры конечных предикатов. К ним, в частности, относятся синтез схем, реализующих частичные алфавитные операторы, синтез вполне конечных автоматов, разработка специализированных схем для автоматической обработки текстов.

Алгебра конечных предикатов наводит на определенные размышления и по поводу методов программирования будущих вычислительных машин. Если мысли — это конечные предикаты, а мыслительная деятельность — процесс решения уравнений алгебры конечных предикатов, то отсюда вытекает возможность полного отказа от внешнего программирования вычислительных машин. Для того чтобы человек мог решать определенные задачи, нет надобности каждый раз снабжать его специальной программой действий. Ему лишь сообщают условия задачи. Например, из пункта А в пункт В выехал велосипедист, расстояние такое-то, время такое-то и т. д., т. е. школьнику сообщаются только связи, присутствующие в задаче, иными словами — ему задается некоторая система отношений. Эти отношения школьник переводит на язык алгебраических уравнений, а затем решает полученные уравнения и таким способом приходит к решению задачи. У школьника имеется «внутреннее программное обеспечение» в виде умения составлять уравнения и решать их. А больше ему для решения задачи ничего и не требуется.

Если следовать этой аналогии, то вычислительную машину достаточно будет снабдить только внутренним программным обеспечением, которое могло бы переводить условия задачи, поступающие в машину, с естественного языка, удобного человеку, на язык уравнений, удобный машине, и могло бы решать получаемые уравнения. При этом никакие программы пользователю ЭВМ не потребуются. Пользователь должен сообщить машине на удобном ему языке лишь условия задачи и что именно требуется найти. Остальное машина сможет сделать сама. При таком подходе мощь систем машинного интеллекта будет определяться лишь тем, какова предельная сложность уравнений алгебры конечных предикатов, которые способна эффективно обработать данная система машинного интеллекта.

Описанный подход к программированию порождает массу интереснейших задач. Нужно, к примеру, научиться выражать на языке алгебры конечных предикатов отношения, заключенные во фразах естественного языка, а также смысл слов и понятий, которыми пользуется человек. Важна и обратная задача: научиться переводить выражения алгебры конечных предикатов на естественный язык, транслировать формулы с высокого уровня абстракции на более низкий и наоборот. Все эти вопросы достаточно легко

поддаются научной разработке, но их очень много, и поэтому требуется привлечение больших сил в эту область, если желательно, чтобы теория интеллекта смогла в обозримом будущем оказать существенную помощь разработчикам систем искусственного интеллекта.

Одна из интереснейших задач теории интеллекта состоит в том, чтобы суметь добраться физическими методами до субъективных состояний человека. Мысли человека, его ощущения, представления, восприятия — все это субъективные состояния. Точные знания о них необходимы в теории интеллекта. Но субъективные состояния человека идеальны, они бестелесны, их не пощупаешь как физический предмет, непосредственно не измеришь как массу тела или силу тока. Если окажется, что мысли, восприятия и представления человека недоступны объективному, т. е. строго научному исследованию, то вся теория интеллекта повисает в воздухе, становится бездоказательной. Например, выше утверждалось, что мысли — это ни это иное как конечные предикаты. Но если этого нельзя будет доказать физическим экспериментом, то все подобные заявления останутся всего лишь беспочвенными предположениями.

К счастью, теория интеллекта располагает общим методом вполне объективного физического изучения психологических состояний человека, в том числе его ощущений, восприятий, представлений, понятий и мыслей. Это — *метод сравнения* [3, с. 85], который основан на понятии конечного предиката. Согласно этому методу сам человек выполняет роль экспериментальной установки. В опыте испытуемому предъявляются внешние физические предметы — зрительные картинки, звуки, фразы, тексты и т. п. Испытуемый их воспринимает и реагирует на них двойным ответом «да» или «нет», руководствуясь специальным заданием исследователя. Этим своим поведением испытуемый реализует некоторый конечный предикат. Свойства этого предиката экспериментально изучаются и математически формулируются. Исследователь всегда может дать такое задание испытуемому, чтобы из свойств реализуемого им предиката можно было путем специального математического анализа чисто логически вывести полное математическое описание изучаемых субъективных состояний испытуемого, а также найти вид функции, лежащей в основе преобразования физических предметов в порождаемые ими субъективные образы.

Таким образом, параметры внутреннего мира человека могут быть объективно измерены, правда, это будут не прямые измерения, а косвенные, но от этого их сила не уменьшается. Именно таким путем было, например, установлено, что цветовые ощущения человека можно формально представить в виде троек чисел, которые получаются в результате интегрирования спектров соответствующих световых излучений с определенными весовыми функциями. Точно так же можно доказать, что наши мысли — это конечные предикаты вполне определенного вида. Этим же методом можно будет найти вид функции, преобразующей тексты в соответствующие им смыслы и т. п. Все это — не беспочвенные фанта-

зии, многое из этого делается уже сегодня, и ряд важных результатов на этом пути уже получен. Но получение подобных результатов достигается ценою огромного труда.

Вообще, как показывает история развития науки, любое физическое исследование, имеющее целью математическое описание законов природы, всегда дается ценою затраты очень больших трудов. Другого пути, к сожалению, в науке нет. Этим же ограничениям подвержены и исследования в области теории интеллекта. Преодолеть это ограничения можно лишь расширением фронта работ в данной области. Как показывает опыт уже приведенных исследований, такое расширение вполне возможно.

**Список литературы:** 1. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Теория интеллекта. Математические средства. Х., 1984. 143 с. 2. Нильсон Н. Принципы искусственного интеллекта. М., 1985. 340 с. 3. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Теория интеллекта. Проблемы и перспективы. Х., 1987. 160 с. 4. Гильберт Д., Бернайс П. Основания математики. Логические исчисления и формализация арифметики. М., 1979. 557 с. 5. Гильберт Д. Основания геометрии. М.; Л., 1948. 491 с. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Теория интеллекта. Проблемы и перспективы. Х., 1986. 160 с.

*Поступила в редколлегию 19.12.88*

УДК 621.84 : 535.3

*А. В. ЛУИЗОВ, д-р физ.-мат. наук, Н. С. ФЕДОРОВА*

## **ЦВЕТ КАК ОЩУЩЕНИЕ И КАК ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА**

Что такое цвет? В летний день мы подходим к лесу и видим зеленую листву деревьев на фоне голубого неба, по которому плывут белые облака. Зеленый, голубой, белый... Мы непосредственно их ощущаем. Цвет — несомненно, наше ощущение. Но это ощущение дает нам сведения о материальных предметах, которые нас окружают, отражает их свойства, помогает воспринять материальный мир вокруг нас.носителем информации служит свет, и тот или иной спектральный состав рассеиваемого предметом света мы воспринимаем как цвет этого предмета.

Материальный стимул может быть исследован качественно и количественно и определен как физическая величина. Таким образом, цвет можно считать и ощущением, и физической величиной. Нужно только строго различать эти два значения слова цвет и, когда это необходимо, пояснять, какое значение мы имеем в виду.

В международном светотехническом словаре дается два определения слова цвет.

Цвет (воспринимаемый); цветовое ощущение. Аспект зрительного восприятия, позволяющий наблюдателю различать цветовые стимулы, отличающиеся по спектральному составу излучения, т. е. отличать один объект от другого, если различие между ними обусловлено только различием спектрального состава исходящего от них света.

Цвет (в колориметрии). Трехмерная векторная величина, характеризующая группу излучений визуально неразличимых в колориметрических условиях наблюдения, т. е. в таких условиях визуального сравнения, при которых любые излучения одинакового спектрального состава неразличимы глазом.

*Примечание 1.* Цвет (воспринимаемый) зависит не только от цветового стимула, но и от условий наблюдения: предварительной цветовой адаптации, яркости, цветности фона и пр.

Цвет в колориметрии однозначно определяется координатами цвета излучения.

*Примечание 2.* В тех случаях, когда смысл термина ясен из контекста, вместо терминов цвет (воспринимаемый), цветовое ощущение и цвет (в колориметрии) употребляется термин цвет.

Слово колориметрия происходит от латинских слов color — цвет и metrum — мера и, следовательно, означает: наука об измерении цвета. Измеряется, конечно, не ощущение, а физический стимул, физическая величина — цвет. Поэтому физики, колориметристы часто забывают о другом значении слова цвет и без всяких оговорок считают цвет физической величиной. С другой стороны, психологи и физиологи, которых интересуют ощущения и механизм их развития в органе зрения, склонны рассматривать цвет только как ощущение.

Обсуждение работы [1] продолжается и в настоящее время. Так, ранее отмечалось [2]: «Согласно нашим представлениям, цвет — не физическая величина. Цвет — физиологический феномен и определяется как точка в трехмерном пространстве, организованном тремя парами ортогональных векторов. Векторы образованы высшими уровнями цветового зрения».

Итак, что такое цвет в колориметрии, цвет как физическая величина? Пусть у нас имеется поверхность, спектральный коэффициент отражения которой  $\rho(\lambda)$ . Освещена она светом, спектральная плотность мощности которого  $P_\lambda = dP/d\lambda$ . Координаты цвета этой поверхности в системе координат  $X, Y, Z$ :

$$x' = k \int P_\lambda \bar{x}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda; \quad y' = k \int P_\lambda \bar{y}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda;$$

$$z' = k \int P_\lambda \bar{z}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda.$$

Здесь  $x', y', z'$  — координаты цвета,  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda)$  и  $\bar{z}(\lambda)$  — ординаты кривых сложения, т. е. ординаты цветов монохроматических излучений единичной мощности. (Эти значения следует брать из таблицы «Ординаты кривых сложения для стандартного колориметрического наблюдателя» МКО, 1931 г.)  $k$  — нормирую-

щий множитель:  $k = \frac{100}{\int P_\lambda y(\lambda) d\lambda}$ .

Стандартный колориметрический наблюдатель МКО-1931 — приемник излучения, колориметрические характеристики которого соответствуют ординатам кривых сложения  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ , принятым МКО в 1931 г.

Следует подчеркнуть, что ординаты кривых сложения, характеризующие чувствительность каждого из трех приемников глаза к свету с длиной волны  $\lambda$ , у разных людей неодинаковы. Но в результате усреднения большого количества экспериментальных данных были получены величины, принятые официально МКО. После такой стандартизации кривых сложения координаты цвета переста-

ли зависеть от свойства того или иного наблюдателя. Именно поэтому мы и можем считать цвет объективной физической величиной (подобно яркости или световому потоку).

Мы видим, что цвет можно измерить без всяких визуальных наблюдений. Достаточно определить спектральную плотность мощности излучаемого света и спектральный коэффициент отражения освещенной поверхности, чтобы по приведенным формулам рассчитать координаты ее цвета.

Тут некоторые могут сказать: а зачем вообще нужна эта характеристика — цвет, если он не определяется явно физическими величинами  $P_\lambda$  и  $\rho(\lambda)$ ? Дело в том, что если для двух цветов  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$   $P_{\lambda 1} = P_{\lambda 2}$  и  $\rho_1(\lambda) = \rho_2(\lambda)$ , мы конечно найдем, что это один и тот же цвет. Но тот же цвет мы можем получить и для ряда других комбинаций  $P_\lambda$  и  $\rho(\lambda)$ . У каждой координаты под интегралом стоит произведение трех функций  $\lambda$ . Для получения одного и того же значения интеграла, скажем  $x'$  равенства всех слагаемых для всех  $\lambda$  достаточно, но не необходимо. Меньшая величина одних слагаемых может компенсироваться большей величиной других и интегралы могут оказаться равными. Излучения, разные по спектральному составу, но одинаковые по цвету называются метамерными.

Значит, цвет действительно особая величина. Возьмем две пары метамерных цветов  $\Pi_1 = \Pi'_1$  и  $\Pi_2 = \Pi'_2$  и будем складывать их попарно. Окажется  $\Pi_1 + \Pi_2 = \Pi'_1 + \Pi'_2 = \Pi_1 + \Pi_2 = \Pi'_1 + \Pi'_2$ , т. е. при сложении цвет ведет себя так же, как его метамер. Цвет определяется только его координатами и раз они установлены, цвету, образно говоря, нет дела до своего спектрального состава.

Предположим, у нас имеется набор цветных карточек. Будем называть их образцами. Пусть при освещении источником А ( $T_{\text{ц}} = 2856 \text{ K}$ ) цвет образца 1 окажется равным цвету образца 2. Запишем это равенство так:  $\Pi_1(A) = \Pi_2(A)$ .

Но при источнике В ( $T_{\text{ц}} = 4874 \text{ K}$ ) уже может оказаться, что  $\Pi_1(B) \neq \Pi_2(B)$ .

Значит, при источнике А цвета  $\Pi_1(A)$  и  $\Pi_2(A)$  метамерны, а при источнике В — разные. Если же цвета двух образцов останутся равными при любом освещении, то равны их коэффициенты спектрального отражения  $\rho_1(\lambda) = \rho_2(\lambda)$  для любых  $\lambda$ .

Для стандартных источников света  $P_\lambda$  можно взять из таблиц, для нестандартных — измерить.  $\rho(\lambda)$  также может быть измерено, как и  $P_\lambda$  объективным методом. Значит цвет любой поверхности — объективная величина.

Впечатление, создаваемое этим цветом, может меняться в широких пределах в зависимости от условий наблюдения. Приведем пример резкого изменения ощущения одного и того же цвета. Пусть наблюдатель через отверстие в белом экране смотрит на поверхность, окрашенную в оранжевый цвет и освещенную лампой яркостью  $10 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ . Создадим на белом экране такую же яркость  $10 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ , т. е. яркости цветной поверхности и экрана будут рав-

ны. Наблюдатель видит поверхность оранжевого цвета. Далее включим еще несколько ламп, создавая на белом экране яркость  $100 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ . Теперь наблюдатель увидит, что цветная поверхность стала коричневой. Однако цвет поверхности при этом не изменился, а ощущение этого цвета стало другим в результате повышения уровня адаптации зрения наблюдателя. По сравнению с яркостью  $100 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$  яркость  $L_d = 10 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$  стала небольшой, цветная поверхность как бы потемнела, а темно-оранжевый цвет мы и называем коричневым.

При неизменном цвете ощущение этого цвета может сильно меняться в зависимости от условий наблюдения: от яркости и цветности окружающего фона (одновременный контраст), от яркости и цветности поверхности, к которой был адаптирован наблюдатель до начала наблюдения (последовательный контраст), от величины наблюдаемого цветного поля и т. д. Все эти влияния условий на восприятие, т. е. ощущение цвета, можно изучать, находить качественные и даже количественные закономерности в них. Но нужно твердо помнить, что здесь изучается уже не цвет как физическая величина, а цвет как ощущение. Это уже не колориметрия.

Путаница начинается с того момента, когда физическую величину — цвет — начинают смешивать с ощущением цвета. Между тем ощущение, физиологические процессы в зрительной системе и связи их с ощущениями лежат в основе всех исследований авторов [1]. Это определяется специальностью психологов, и было бы вполне допустимо, если бы анализом цветовых ощущений они ограничились. Но они настаивают на реформе колориметрии, доходят до утверждения, что цвет четырехмерен и т. д. Очень существенно, что все четыре координаты цвета могут иметь положительные и отрицательные значения, а это значит, что и яркость может быть отрицательной. Авторы претендуют на построение сферической модели цветового зрения, по существу более совершенной колориметрической системы.

Авторы книги [1] в своих основных утверждениях доходят до абсурда. Так, утверждая, что цвет определяется четырьмя координатами, они оговаривают, что сумма квадратов его четырех координат равна постоянной величине  $R^2$ . Иначе говоря, независимых координат цвета только три.

Комиссия «цветовые измерения» секции «Метрологическое обеспечение координационного совета по метрологии и приборостроению НТС Госстандарта считает книгу бесполезной, а практику издания книги без рецензирования ее специалистами недопустимой.

Известны попытки ввести в колориметрию отрицательную яркость. В. Д. Глезер и А. В. Бертулис, не соглашаясь в целом с авторами «Цветового зрения» (см. упомянутую выше дискуссию), настойчиво предлагают ввести в колориметрию отрицательную яркость и даже «черный свет». Отрицательную яркость можно ввести только одним способом — принять за нуль яркость адаптации. Но это сразу лишает колориметрию объективности.

Предположим, стандарт требует, чтобы завод выпускал ткань определенного цвета при стандартном источнике А. Но как ввести сюда яркость адаптации? Ведь это даже не яркость самой ткани, а яркость поверхности, ее окружающей (вспомним пример с оранжевым образцом). А может и яркость поверхностей, на которые смотрит наблюдатель до взгляда на ткань.

Таким образом, попытка ввести в колориметрию яркость адаптации лишает колориметрию одного из важнейших достоинств и по существу закрывает ей выход на арену технических применений.

Следует еще сказать о проблеме разработки равноконтрастных систем. Их создание и совершенствование может иметь большое практическое значение, но при этом опять-таки следует четко различать границы, которые указал еще Шредингер [1], вводя в цветоведение понятия о высшей и низшей метриках цвета.

Несколько упрощая, можно сказать, что колориметрия основана на установлении равенства, неразличимости двух цветов. Эту часть цветоведения Шредингер назвал «низшей метрикой цвета», или «колориметрией».

Изучение различения цветов, установление порогов цветоразличения, их измерение и т. п. относится к высшей метрике цвета. Значительные различия в цвете можно измерять по числу порогов при переходе от одного цвета к другому. Но в пространстве цветов *RGB* или *XYZ* переход от одного цвета к другому по прямой отнюдь не соответствует наименьшему числу порогов. Искусственным преобразованием системы можно привести ее к такому состоянию, чтобы всюду равные отрезки прямых, соединяющих две точки (два цвета), соответствовали одинаковым различиям между ними, выраженным в числе порогов. Такая система называется «равноконтрастной». До сих пор создано несколько вариантов равноконтрастных систем, но все они удовлетворяют стоящей перед ними задаче только приближенно.

Два варианта равноконтрастного цветового пространства рекомендованы сейчас решениями МКО: системы  $L^*U^*V^*$  и  $L^*a^*b^*$ . Указаны формулы перехода к каждой из этих систем от системы *XYZ*.

Авторы [3] претендуют на то, что их сферическая модель изотропного пространства цветоразличения более совершенна, чем предложенные до сих пор модели равноконтрастных цветовых пространств. Но они не дают способа отыскания цвета в их системе ни на основании каких-либо изменений, ни с помощью формул перехода к их координатам от общепринятых колориметрических систем. Значит, сферическая модель не связана ни с какой реальностью, ее существование в сущности призрачно.

Равноконтрастные системы — это попытка перекинуть мост между цветом как физической величиной и цветом как ощущением. Стремление к созданию таких мостов разумно и может быть полезным. Но здесь нужно быть особенно осторожным, чтобы избежать (как предупреждал еще Шредингер) тупиков, ошибок и вообразаемых открытий.

**Список литературы:** 1. Сопов Е. Н., Измайлов Ч. А. Цветовое зрение. М., 1984. 175 с. 2. Глезер В. Д., Бертулис А. В. Обсуждение книги «Цветовое зрение»// Светотехника. 1987. № 3. С. 12—19. 3. Юстова А. В., Друзов А. В. О книге «Цветовое зрение»//Светотехника. 1986. № 6. С. 27.

*Поступила в редколлегию 10.10.88*

УДК 681.518 : 61

Е. Г. КАЧКО, канд. техн. наук, Е. М. КУТУЗОВА, Ю. С. МАРЧЕНКО,  
Н. П. ПАСЬ

### **АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ОБСЛЕДОВАНИЯ ВКУСОВОГО АНАЛИЗАТОРА С ЦЕЛЬЮ УТОЧНЕНИЯ ДИАГНОЗА**

---

Данные обследования вкусового анализатора применяются для диагностики различных заболеваний в медицинской практике. Ранее [1] сделан обзор, подтверждающий целесообразность использования нарушений вкусовой чувствительности не только для уточнения, но и для раннего распознавания заболеваний. Дополнительные сведения указывают на полезность данных о расстройствах вкуса. Рассмотрим некоторые из них. Нарушения вкуса делят на качественные и количественные. В работе [2, с. 59] дана следующая классификация.

Количественные нарушения вкуса: повышение вкусовой чувствительности (гипергеузия); снижение вкусовой чувствительности (гипогеузия); отсутствие вкусовой чувствительности (агеузия); Качественные нарушения вкуса: извращение восприятия вкусовых веществ (парагеузия); неприятные вкусовые ощущения (какогеузия); вкусовые парестезии; нарушения узнавания вкусовых веществ; вкусовые галлюцинации.

Использование отклонений вкусовой чувствительности эффективно при анализе заболеваний желудочно-кишечного тракта (колит, гастрит, заболевания печени, хронический аппендицит и др.). Нарушения вкусового восприятия происходит при эндокринных заболеваниях. Так, при диабете вкусовая чувствительность понижается или выпадает по всей поверхности языка. Характерные изменения вкусовой чувствительности отмечаются при других заболеваниях.

Обобщены данные изменения вкусовой чувствительности у лиц, находящихся в неординарных условиях. Как отмечалось многими космонавтами в полете существенно меняется вкусовое восприятие, требующее корректировки в питании. С этой целью польскими учеными были подготовлены эксперименты с использованием электрогустометра. При моделировании невесомости возникает нарушение деятельности органа вкуса. Так, прием пищи вызывает не повышенное, а пониженное значение порогов. Установлено, что у летчиков наблюдаются высокие пороги вкусового восприятия сладкого, кислого и соленого. Таким образом, анализ литературных данных показывает, что состояние вкусового анализатора зависит

от общего состояния человека и условий, в которых он находится. При различных отклонениях могут нарушаться функции вкусового анализатора. Нарушение отдельных функций является одним из ранних симптомов некоторых заболеваний. Нарушения могут быть качественными и количественными. В виду большого многообразия характерных отклонений от нормы для различных заболеваний целесообразно автоматизировать оценку отклонений и выбор вероятного заболевания.

Из описанных медицинских информационных систем неизвестны такие, которые используют отклонения вкусовой чувствительности в целях диагностики. В работах [3, 4] описан язык для задания данных исследования вкусового анализатора общим, капельным и методом плетизмографии. Язык позволяет задавать количественные характеристики органа вкуса. Транслятор, сравнивая полученные данные с нормальными показателями, оценивает отклонения от нормы, используя пятибальную шкалу: значительно меньше нормы (LTLT), норма (NORM), больше нормы (MORE), значительно больше нормы (GTGT), меньше нормы (LESS), и строит позиционный вектор, содержащий значения отклонений от нормы. Номер элемента вектора определяется методом обследования и компонентом (сладкое, кислое, горькое, соленое). Задание качественных изменений вкуса, а также задание жалоб большого в языке не предусмотрено.

Расширим язык. После описания данных обследования будем задавать качественные отклонения вкуса и жалобы. Предложенный в работе вариант системы ориентирован для использования при диагностике заболеваний желудочно-кишечного тракта, эндокринных заболеваний, заболеваний мозга и нервной системы, так как данные о качественных и количественных изменениях вкуса для этих заболеваний наиболее полны. При расширении языка возникли следующие проблемы.

1. Даже при ограничении круга болезней, охватываемых системой, заданной выше, число различных жалоб и качественных характеристик велико, поэтому необходимо предусмотреть специальные способы организации таблиц этих данных с целью ускорения процедур поиска, включения и исключения из таблиц.

2. Одни и те же жалобы могут быть выражены различными словосочетаниями, в связи с этим возникает задача обработки синонимов.

3. Сравнение жалоб, записанных в разных падежах, также затруднено.

Для задания жалоб и качественных характеристик в работе используются хеш-таблицы с внутренними цепочками переполнения, в которых формируются связанные списки для разрешения коллизий. Таблица синонимов формируется по тому же принципу, что и таблица жалоб, имеется дополнительное поле для задания ссылки на строку основной таблицы. Все сведения о качественных отклонениях и жалобах задаются в именительном падеже, имеется алфавитный справочник допустимых заданий. Для каж-

дой из приведенных характеристик может быть задан весовой коэффициент, определяющий «вес» указанной характеристики по отношению к другим для заданного заболевания.

При инициализации системы формируются таблицы жалоб и качественных отклонений, таблицы синонимов для указанных данных и болезней.

Система функционирует в двух режимах: обучения и постановки диагноза. В первом режиме системе задаются о каждом заболевании следующие сведения: название болезни; результаты обследования вкусового анализатора на языке описания данных; качественные характеристики отклонений вкусовой чувствительности, жалобы больного, наиболее характерные для данного заболевания, другие сведения.

Во втором режиме задаются такие же сведения, но без названия болезни.

При работе системы в режиме обучения формируется база данных, включающая в себя для каждого заболевания вектор данных обследования вкусового анализатора различными методами, вектор жалоб и качественных отклонений с соответствующими им весовыми коэффициентами. Система открыта, т. е. допускается изменение данных, а также их дополнение для других заболеваний.

В режиме постановки диагноза по данным обследования больного рекомендованными методами строится позиционный вектор, содержащий количественные отклонения от нормы по каждому компоненту при заданных эталонах. По указанным симптомам система строит вектор симптомов, содержащих номера их в основной таблице симптомов. После сортировки вектора симптомов в порядке возрастания их номеров формируются вероятные диагнозы. Для этого система использует таблицы, содержащие наименование болезни, шкалу отклонений и вектор симптомов для каждого заболевания.

Рассмотрим пример функционирования системы в режиме постановки диагноза.

Пусть сведения об обследовании вкусового анализатора на языке задания данных [14, 15] имеют вид:

ОБЩИЙ МЕТОД:

СЛАДКОЕ: ГЛЮКОЗА: 1.6,

КИСЛОЕ: ВИННАЯ КИСЛОТА: 0.01,

ГОРЬКОЕ: ХИНИН СОЛЯНОКИСЛЫЙ: 0.00007,

СОЛЕННОЕ: ХЛОРИСТЫЙ НАТРИЙ: 0.7;

\*

Жалобы и некоторые качественные характеристики

ГИПЕРГЛИКЕМИЯ

ПЕЧЕНЬ УВЕЛИЧЕНА

ЖАЖДА

СУХОСТЬ ВО РТУ

ЧУВСТВО ГОЛОДА ПОСТОЯННОЕ

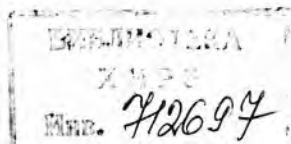
СНИЖЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

КОЖА СУХАЯ

ЦИТОВИДНАЯ ЖЕЛЕЗА УВЕЛИЧЕНА

СЕРДЦЕБИЕНИЕ

\*\*\*\*



Действия системы.

1. Построение шкалы отклонений.

Шкала, полученная системой, имеет вид:

GTGT, NORM MORE NORM.

Это означает, что чувствительность к сладкому значительно повышена, к горькому повышена, чувствительность к кислому и соленому в пределах нормы.

Таблица 1

Основные жалобы

1-А	Аппетит повышен	40
...	...	...
4-Г	Гипергликемия	0
...	...	...
8-Ж	Жажда	0
...	...	...
12-К	Кожный зуд	0
...	...	...
17-П	Печень увеличена	0
...	...	...
19-С	Слабость	53
...	...	...
30-Я	Язык сухой	0
...	...	...
40-А	Артериальное давление повышено	41
...	...	...

Синонимы

12-К	Кожа сухая	0	12-К
...	...	...	...
19-С	Снижение работоспособности	56-С	19-С
...	...	...	...
25-Ч	Чувство голода	0	1-А
...	...	...	...
56-С	Сухость во рту	0	30-Я

Таблица 2

Болезни	Шкалы отклонений	Векторы симптомов
12	Диабет сахарный	12 1, 4, 8, 12, 13, 17, 18, 19, 27
73	Эндокринные нарушения	73
....	....	....

2. Построение вектора симптомов. В табл. 1 показан механизм определения номера симптома по основной и дополнительной таблицам симптомов, сформированных при инициализации системы. В результате просмотра таблиц система формирует следующие номера:

{4, 17, 8, 30, 1, 19, 12, 27, 53}

3. Сортировка вектора симптомов:

{1, 4, 8, 12, 17, 19, 27, 30, 53}

4. Формирование вероятных диагнозов. По таблице шкал отклонений находится строка, вектор отклонений в которой совпадает с вектором отклонений, полученным на первом шаге (табл. 2, строка 12). Анализируется строка с этим же номером в таблице, содержащей векторы симптомов. Если некоторые компоненты не совпадают, то формируются соответствующие им симптомы со знаком «?». Если среди векторов отклонений имеется несколько одинаковых векторов, совпадающих со сформированными на первом шаге, для каждой строки таблицы повторяются указанные выше действия. Если нет вектора, все компоненты которого совпадают с требуемыми, определяются векторы, которые отличаются не более чем на одну градацию по одному компоненту. В результате выполнения система формирует:

1. Диабет сахарный  
Щитовидная железа увеличена?  
Сердцебиение?

Система реализована на ЕС ЭВМ. Для реализации использовались алгоритмические языки ФОРТРАН, ПЛ/1, Ассемблер. Разработаны средства диагностики при неверном задании данных обследования и жалоб больного. В дальнейшем предполагается реализация системы с использованием персональных ЭВМ.

**Список литературы:** 1. Марченко Ю. С. К вопросу об использовании данных патологии вкусового анализатора для машинной диагностики//Пробл. бионики. 1970. Вып. 5. С. 74—78. 2. Благовещенская Н. С., Мухамеджанов Н. З. Вкус и его нарушения при заболеваниях уха и мозга/Медицина. М., 1985. С. 3—160. 3. Качко Е. Г., Марченко Ю. С. Системы программирования данных исследования вкусового анализатора. Сообщ. 1//Пробл. бионики. 1982. Вып. 28. С. 118—121. 4. Качко Е. Г., Марченко Ю. С. Система программирования данных исследования вкусового анализатора. Сообщ. 2//Пробл. бионики. 1982. Вып. 29. С. 109—114.

Поступила в редколлегию 10.10.88

УДК 519.683.5 : 519.256

Э. А. ДЕДИКОВ, канд. техн. наук, Е. В. АЛИСЕИКО

## О СРАВНИМОСТИ СТРУКТУР ДАННЫХ В РБД

Использование концепции баз данных при проектировании эффективных систем обработки технико-экономической информации приводит к необходимости установления смысловой эквивалентности данных как с целью нормализации лексики языка описания предметной области (п. о.) [1], так и с целью информационной увязки комплекса задач обработки данных на рассматриваемой

п. о., обеспечивая тем самым интеграцию данных и одинаковое понимание различными пользователями одних и тех же данных, отличающихся внешним представлением.

Решение этой задачи традиционными средствами проектирования данных невозможно, так как они не предусматривают использования семантических категорий. Ввиду того, что семантические категории возникают на стадии концептуального проектирования при анализе п. о., то для решения поставленной задачи необходимо установить более тесную связь с информационной моделью п. о., учитывающей семантические коллизии.

Процедуру установления семантической эквивалентности данных будем определять на основе «меры» синонимии [2].

Рассмотрим более общий случай, в основе которого лежит понятие сравнимости структур данных, предполагая, что эквивалентность структур данных является частным случаем сравнимости.

Изображение объектов п. о. с помощью понятия типа данных в РБД дает возможность использовать теорию типов применительно к объектам п. о. для определения понятия сравнимости соответствующих структур данных.

Объекту п. о. поставим в соответствие абстрактный тип данных, а его имени — имя типа данных.

Известно [1, 3], что для абстрагирования объектов используются классификация и обобщение. Подразделение объектов на классы позволяет установить связь этих классов с понятием типа данных [4]. Путем обобщения можно связать похожие в информационном смысле объекты с родовым объектом и поддерживать механизм тип — подтип.

Концепция информационного абстрагирования [5] и ее поддержка механизмами работы с абстрактными типами позволяет рассматривать объект п. о. как параметризованный (или родовой) тип данных [3, 5]. Родовой тип данных представляет собой образующий тип, из которого конструируются подтипы, причем множество значений подтипа является подмножеством значений образующего типа.

При определении типа данных [5] операция конструирования типа данных должна содержать четыре аргумента: внешность, абстрактное описание, конкретное описание и описание связи. Первые два называют спецификацией типа и понимают под этим приращение теории или сигнатуры системы типов, а последние — реализацией типа, соответственно понимая под этим приращение алгебры системы типов.

Если некоторые идентификаторы типов, используемые в спецификации и реализации, являются свободными [1] переменными, то тип становится функцией от значений этих переменных. Ее значениями служат типы, характеризуемые тем же множеством операций, однако с различными типами некоторых операндов и/или результатов.

Если имеется родовой тип данных, тогда конкретные типы возникают из него фиксацией некоторого числа идентификаторов

типов из спецификации и реализации. Если же не фиксируется ни один тип идентификатора, то конструктор типов вырабатывает тип данных, соответствующих родовому объекту.

Пусть мир состоит из объектов п. о., вступающих в связи между собой. Объект п. о. имеет собственные характеристики, заданные параметрами соответствующего родового типа данных, которые должны фиксироваться как в случае описания отдельного объекта, так и в случае описания ситуации связи нескольких объектов.

Итак, мир состоит из множества  $T$  объектов  $TO_i$ :

$$T = \{TO_1, TO_2, \dots, TO_k\},$$

каждый из которых является параметризованным или родовым типом данных вида

$$TO_r = \{RO_1^{(r)}, RO_2^{(r)}, \dots, RO_{s_r}^{(r)}; \Omega\}, \quad (1)$$

где  $\Omega$  — множество операций над типом. В свою очередь, каждый из параметров  $RO_k^{(r)}$  на  $r$ -м объекте может быть представлен множеством своих значений  $\{A_1, \dots, A_n\}$ . Тогда

$$TO_r = \{ \langle RO_1^{(r)}, \{A_1, \dots, A_{n_1}\} \rangle, \langle RO_2^{(r)}, \{A_1, \dots, A_{n_2}\} \rangle, \dots, \langle RO_s^{(r)}, \{A_1 \dots A_{n_s}\} \rangle, \Omega \}. \quad (2)$$

Пусть  $\hat{T}$  — множество подтипов, отвечающее некоторому родовому типу. Тогда имеет место функция  $f_i: \hat{T} \rightarrow \hat{T}$ ,  $1 < i \leq 2^n$ , где  $n = |\{RO_i^{(r)}\} \cup \{D_i\}|$ .

Множества  $\{A_1, \dots, A_n\}$  могут, в частности, представлять собой имена атрибутов РБД.

Пусть  $S$  — множество схем отношений,

$$S = \{R_1, R_2, \dots, R_n\},$$

и  $R_i$  — схема отношения, образованная конечным множеством  $A$  имен атрибутов.

Свяжем с каждым  $A_i \in A$  конечное множество возможных  $\{a_{ik}\}$  элементов простого типа [3], называемых значениями атрибута с именем  $A_i$ . Пару  $\langle A_i, \{a_{ik}\} \rangle$  будем называть атрибутом и обозначать в виде  $[A_i]$ . Пусть задано множество имен доменов  $D = \{D_i\}$ , таких, что каждому имени домена  $D_k$  сопоставлено множество его значений  $\{d_k\}$ . Пару  $\langle D_i, \{d_{ik}\} \rangle$  будем называть доменом и обозначать в виде  $[D_i]$ , причем тип домена однозначно определяется его именем. Тогда каждому  $[A_i]$  соответствует  $[D_i]$ , содержащий все допустимые значения  $\{a_{ik}\}$ . Факт непересекаемости различных доменов может использоваться для установления факта непересекаемости множеств возможных значений атрибутов, что в свою очередь позволяет решать вопрос об установлении эквивалентности по данным [6, 7].

Другими словами, имя домена однозначно определяет тип домена и элементы множества его значений  $\{d_k\}$ . Атрибут  $A_i$  связан

с доменом  $[D_i]$  тогда и только тогда, когда  $\{a_i\} \subseteq \{d_i\}$ . Этот факт будем изображать в виде  $[A_i] \rightarrow [D_i]$ . Будем говорить, что множество  $A$  согласовано по типам с множеством  $D$  и обозначать  $A\Delta D$  тогда и только тогда, когда каждый из атрибутов с именем из  $A$  связан ровно с одним доменом, носящим имя из  $D$ , т. е.

$$A\Delta D \Leftrightarrow \forall [A_i], A_i \in A \exists! D_k \in D \text{ and } [A_i] \rightarrow [D_k]. \quad (3)$$

Введем следующие критерии сравнимости атрибутов.

Если для атрибутов  $[A_i], [A_j], A_i \in A, A_j \in A$  и для некоторого домена  $[D_k]$  выполняется условие

$$([A_i] \rightarrow [D_k]) \text{ and } ([A_j] \rightarrow [D_k]),$$

то будем говорить о сравнимости атрибутов с точностью до связи с доменом:

$$[A_i] D_k [A_j] \stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} ([A_i] \rightarrow [D_k]) \text{ and } ([A_j] \rightarrow [D_k]) \text{ and } (A\Delta D). \quad (4)$$

В формуле (2) параметры объектов рассматриваются в виде пар

$$\langle RO_i, \{A_i\} \rangle, \text{ где}$$

$\langle RO_i, \{A_i\} \rangle$ , где  $RO_i$  — имя параметра,  $\{A_i\}$  — множество значений параметра, состоящее из имен атрибутов.

Обозначим пару  $\langle RO_i, \{A_i\} \rangle$  через  $[RO_i]$  и назовем ее идентификатором, где  $RO_i$  — имя идентификатора,  $\{A_i\}$  — множество значений идентификатора.

Если тип объекта задан перечислением имен идентификаторов и набором операций (1), то будем говорить о его задании с точностью до имен идентификаторов.

Если имена атрибутов  $A_i$  и  $A_k$  могут быть заменены одним и тем же значением  $RO_i$  из  $\{RO_i\}$ , то считаем их сравнимыми с точностью до имени идентификатора.

Под возможностью замены имени  $A_i$  именем  $RO_i$  будем понимать тот факт, что  $A_i$  принадлежит множеству значений идентификатора

$$[A_i] \rightarrow [RO_i] \stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} (A_i \in \{A_i\}) \text{ and } [RO_i] = \langle RO_i, \{A_i\} \rangle.$$

2. Атрибуты сравнимы с точностью до имени идентификатора

$$[A_k] \stackrel{RO_i}{\sim} [A_i] \stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} [A_k] \rightarrow [RO_i] \text{ and } [A_i] \rightarrow [RO_i]. \quad (5)$$

3. Атрибуты сравнимы с точностью до идентификатора

$$\begin{aligned} [\forall k] \stackrel{[RO]}{\sim} [A_i] \stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} ([A_k] \stackrel{RO_i}{\sim} [A_i]) \text{ and } (A\Delta D) \text{ and } \exists \\ \exists D_s \in D ([A_k] \rightarrow [D_s]) \text{ and } [A_i] \rightarrow [D_s]. \end{aligned} \quad (6)$$

4. Атрибуты сравнимы с точностью до типа объектов

$$[A_k] \stackrel{TO_r}{\sim} [A_i] \stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} [A_k] \rightarrow [RO_k] \text{ and } [A_i] \rightarrow [RO_i] \text{ and } (RO_k \in TO_i) \times \times \text{ and } (RO_i \in TO_i). \quad (7)$$

Сравнимость объектов связей (в смысле модели Чен [8]) может квалифицироваться посредством установления видов сравнимости исходных типов-сущностей.

**Пример.** Пусть в предметной области имеют смысл документы, изображенные в табл. 1—5, а в базе данных им соответствуют реляционные отношения, приведенные в табл. 6—10.

Документы № 1 и № 3 содержат информацию за текущий день месяца, № 4 — за все дни, предшествующие данному. В документе № 5 хранится итоговая информация за месяц.

Таблица 1  
Документ № 1

Шифр дефекта	Дата: 25.01.88.	
	Номер телевизора	
1	29	
	30	
	41	
2	40	
	50	

Таблица 2  
Документ № 2

Шифр дефекта	Наименование дефекта
1	Перегорание проводов
2	Выход из строя трансформаторов
3	Дефект кинескопа

Таблица 3  
Документ № 3

Шифр дефекта	Дата: 25.01.88	
	Количество неисправностей	
1	3	
2	2	

Таблица 4  
Документ № 4

Шифр дефекта	Дата: 25.01.88	
	Количество неисправностей	
1	100	
2	30	
3	6	

Таблица 5  
Документ № 5

Наименование дефекта	Дата: 31.01.88	
	Количество неисправностей	
Перегорание проводов	120	
Дефект кинескопа	90	

Таблица 6

DATE	CODE	NUMBER
25.01.88	1	29
25.01.88	1	30
25.01.88	...	
25.01.88	2	40
25.01.88	...	
26.01.88	1	81
26.01.88	...	

Таблица 7

CODE	NAME
1	Перегорание проводов
2	Выход из строя трансформатора
3	Дефект кинескопа
...	

Таблица 8

DATE	CODE	Q
25.01.88	1	3
...	...	...
25.01.88	2	2
26.01.88	1	3
...	...	...

Таблица 9

DATE	CODE	Q
25.01.88	1	100
25.01.88	2	30
25.01.88	3	6
...	...	...
26.01.88	1	80
...	...	...

Таблица 10

DATE	NAME	Q
31.01.88	Перегорание проводов	120
31.01.88	Дефект кинескопа	90
...	...	...
29.02.88	Перегорание проводов	100
...	...	...

Тогда согласно (1—3) имеем:  
 ВРЕМЯ = {Идентификатор-даты, Отрезок-времени,  $\Omega_1$ };  
 ДЕФЕКТЫ = {Идентификатор-дефекта,  $\Omega_2$ };  
 КОЛИЧЕСТВО = {Идентификатор-количества,  $\Omega_3$ };  
 ТЕЛЕВИЗОР = {Идентификатор-телевизора,  $\Omega_4$ };  
 ЦЕХ = {Идентификатор-цеха,  $\Omega_5$ }.

Согласно (2) имеем:

ВРЕМЯ = {<Идентификатор-даты,  $\{D_1\}$ >;  
 <Отрезок-времени,  $\{D_2, D_3, D_4\}$ >  $\Omega_4$ };  
 ДЕФЕКТЫ = {<Идентификатор-дефекта,  $\{D_5, D_6\}$ >,  $\Omega_2$ };  
 КОЛИЧЕСТВО = {<Идентификатор-количества,  $\{D_7\}$ >,  $\Omega_3$ };  
 ТЕЛЕВИЗОР = {<Идентификатор-телевизора,  $\{D_7\}$ >,  $\Omega_4$ },  
 где  $D_1, D_2, \dots, D_7$  имена доменов.

Согласно определению домена  $[D_1] = [D_1, \{d_{1i}\}]$ , где элементами множества  $\{d_{1i}\}$  являются данные типа CHAR 8 со следующим шаблоном значений:

цифра, цифра, символ «/», цифра, цифра, символ «/», цифра, цифра;  $[D_2] = \langle D_2, \{d_{2i}\} \rangle$ , где единственным элементом множества  $\{d_{2i}\}$  является символьная константа «день»;  $[D_3] = \langle D_3, \{d_{3i}\} \rangle$ , где единственным элементом множества  $\{d_{3i}\}$  является символьная константа «месяц»;  $[D_4] = \langle D_4, \{d_{4i}\} \rangle$ , где единственным элементом множества  $\{d_{4i}\}$  является символьная константа «число-дней-с-начала-месяца»;  $[D_5] = \langle D_5, \{d_{5i}\} \rangle$ , где значениями элементов множества  $\{d_{5i}\}$  является множество значений атрибута с именем CODE отношения  $R_2$ ;  $[D_6] = \langle D_6, \{d_{6i}\} \rangle$ , где значениями элементов множества  $\{d_{6i}\}$  является множество значений атрибута с именем NAME из отношения  $R_2$ ;  $[D_7] = \langle D_7, \{d_{7i}\} \rangle$ , где значения элементов множества  $\{d_{7i}\}$  имеют тип INT.

Множество схем отношений имеет вид:

$$S = \{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5\}, \text{ где } R_1 = \{DATE, CODE, NUMBER\},$$

$$R_2 = \{CODE, NAME\}, R_3 = \{DATE, CODE, Q\},$$

$$R_4 = \{DATE, CODE, Q\}, R_5 = \{DATE, NAME, Q\}.$$

## Связь имени атрибута со структурой предметной области

Имя атрибута	Конструируемый тип объекта	Имя идентификатора конструируемого типа объекта	Имя домена	Объекты-связи					
				Тип объекта связи	Имя идентификатора объекта-связи	Имя домена	Тип объекта связи	Имя идентификатора объекта-связи	Имя домена
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$A_1$	ВРЕМЯ	Идентификатор-даты	$D_1$	ВРЕМЯ	Отрезок времени	$D_2$			
$A_2$	ДЕФЕКТЫ	Идентификатор-дефекта	$D_5$	ВРЕМЯ	Отрезок времени	$D_2$			
$A_3$	ТЕЛЕВИЗОР	Идентификатор-телевизора	$D_7$	ВРЕМЯ	Отрезок времени	$D_2$			
$A_4$	ДЕФЕКТЫ	Идентификатор-дефекта	$D_5$						
$A_5$	ДЕФЕКТЫ	Идентификатор-дефекта	$D_6$						
$A_7$	ДЕФЕКТЫ	Идентификатор-дефекта	$D_5$	ВРЕМЯ	Отрезок времени	$D_2$			

1	2	3	4	5	6	7
$A_8$	КОЛИЧЕСТВО	Идентификатор количества	$D_7$	ВРЕМЯ	Отрезок времени	$D_2$
$A_9$	ВРЕМЯ	Идентификатор даты	$D_1$	ВРЕМЯ	Отрезок времени	$D_3$
$A_{10}$	ДЕФЕКТЫ	Идентификатор дефекта	$D_5$	ВРЕМЯ	Отрезок времени	$D_4$
$A_{11}$	КОЛИЧЕСТВО	Идентификатор количества	$D_7$	ВРЕМЯ	Отрезок времени	$D_4$
$A_{12}$	ВРЕМЯ	Идентификатор даты	$D_1$	ВРЕМЯ	Отрезок времени	$D_9$
$A_{13}$	ДЕФЕКТЫ	Идентификатор дефекта	$D_6$	ВРЕМЯ	Отрезок времени	$D_3$
$A_{14}$	КОЛИЧЕСТВО	Идентификатор количества	$D_7$	ВРЕМЯ	Отрезок времени	$D_3$

*Продолжение табл. 11*

8	9	10
---	---	----

ДЕФЕКТЫ

Идентификатор  
дефекта

ДЕФЕКТЫ

Идентификатор  
дефекта

ДЕФЕКТЫ

Идентифи-  
катор  
дефекта

Переобозначим имена атрибутов для случая лексической не-  
однозначности имен атрибутов:

$$R_1 = \{A_1, A_2, A_3\}, R_2 = \{A_4, A_5\}, R_3 = \{A_6, A_7, A_8\}, R_4 = \{A_9, A_{10}\}, \\ R_5 = \{A_{12}, A_{13}, A_{14}\}.$$

Пример проиллюстрирован таблицей.

В результате анализа табл. 11 определяем степени сравнимости  
рибутов:

- 1) атрибуты  $A_1, A_6, A_9, A_{12}$  сравнимы с точностью, определяе-  
й соответственно (4)—(7);
- 2) атрибуты  $A_4$  и  $A_5$  сравнимы согласно (5)—(7), однако опре-  
лены на различных доменах конструируемого типа объекта;
- 3) атрибут  $A_2$  сравним с атрибутами  $A_4, A_7$  как с точностью до  
язи с доменом объекта—связи, так и с точностью до связи с до-  
ном конструируемого типа данных.

иск литературы: 1. Попов Э. В. Экспертные системы. М., 1987. 274 с.  
*Lopes de Mantaras, Trillas E.* Towards a measure of the degree of synonymy//  
zzy Inf. Knowledge Represent and Desic Anal Proc. IFAC Symp. Marscille. 33, Р. 183—186. 3. Цикритзис Д., Лоховски Ф. Модели данных. М., 1985.  
2 с. 4. Нагао. М., Катаяма Т., Узмура С. Структуры и базы данных. М., 1986.  
7 с. 5. Замулин А. В. Типы данных в языках программирования и базах дан-  
х. Новосибирск., 1987. 147 с. 6. Мейер Д. Теория реляционных баз данных.  
, 1987. 608 с. 7. Данные в языках программирования. М., 1982. 227 с.  
*Chen P. P.* — S. The Entity—Relationship Model—Towards a Vnified View  
Data//ACM TODS. 1976. № 1. Р. 9—36. 9. Вирт Н. Программирование на  
ыке модуля-2. М., 1987. 220 с.

Поступила в редколлегию 14.07.88

ДК 510.62

П. П. ТАРАСОВ, С. Ю. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО

## ИССЛЕДОВАНИЕ АКСИМАТИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ПРЕДИКАТОВ

Настоящая статья является продолжением работы [1]. Сле-  
ующая теорема свидетельствует о том, что при  $n < t$  дальнейшее  
мешшение числа указанных выше характеристических свойств  
инейного предиката невозможно.

**Теорема 1.** При  $n < t$  системы характеристических свойств ли-  
нейного предиката  $E$ , фигурирующие в теоремах 2 и 3 работы [1],  
есократимы.

**Доказательство.** Для доказательства теоремы достаточ-  
о установить независимость каждого свойства от совокупности ос-  
альных свойств этих двух систем. Независимость доказываем пу-  
ем введения на декартовом квадрате какого-нибудь  $m$ -мерного  
екторного пространства  $M$  над некоторым полем  $G$  такого предика-  
ата  $E$ , для которого данное свойство не выполняется, а осталь-

ные — выполняются. В роли векторного пространства  $M$  используем арифметическое пространство  $R^m$ . Любой вектор  $x$  в  $R^m$  имеет вид набора  $x = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m)$ , составленного из  $m$  вещественных чисел  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m$ , принимаемых в качестве координат вектора. Обратно, любой набор, составленный из  $m$  вещественных чисел является вектором арифметического пространства  $R^m$ . Коэффициентами служат произвольные вещественные числа. В роли поля используется множество  $R^1$ . В арифметическом пространстве в роли операций сложения и умножения коэффициентов используются сложение и умножение вещественных чисел. В  $R^m$  произведение векторов обладает всеми свойствами произведения векторов. Арифметическое пространство  $R^m$  является разновидностью  $m$ -мерного векторного пространства  $M$  над полем  $G$ , для него выполняются все аксиомы векторного пространства. Будем считать, что в  $R^m$  введен базис  $(p_1, p_2, \dots, p_m)$ , где  $p_1 = (1, 0, 0, \dots, 0, 0)$ ,  $p_2 = (0, 1, 0, \dots, 0, 0)$ , ...,  $p_m = (0, 0, 0, \dots, 0, 1)$ . Оставшаяся часть доказательства теоремы состоит из пяти частей.

1. Докажем, что из рефлексивности, симметричности, транзитивности, аддитивности и однородности не следует  $n$ -мерности предиката  $E$ . Выберем предикат  $E$  следующим образом:  $E(x, y) = D(x, y)$ . Здесь  $D$  — предикат равенства, заданный на  $R^m \times R^m$ . Рефлексивность, симметричность, транзитивность, аддитивность и однородность предиката  $E$  очевидны. Однако  $n$ -мерности предикат  $E$  не обладает. Для того чтобы убедиться в этом, выберем произвольным образом вектор  $l_1, l_2, \dots, l_n \in R^m$  и образуем линейную оболочку  $L$ . Возьмем какой-нибудь вектор  $x \in R^m$  вне оболочки  $L$ . Поскольку  $n < m$ , такой вектор всегда существует. Для любого вектора  $y$ , принадлежащего  $L$ , имеем  $y \neq x$ , следовательно  $E(x, y) = D(x, y) = 0$ . Вместе с тем вектор  $y$ , как принадлежащий линейной оболочке  $L$ , выражается через  $l_1, l_2, \dots, l_n$  при подходящем наборе коэффициентов  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ . Иными словами:

$$y = \sum_{i=1}^n \alpha_i l_i.$$

Таким образом,

$$E\left(x, \sum_{i=1}^n \alpha_i l_i\right) = 0.$$

Следовательно, не существует такого набора векторов  $(l_1, l_2, \dots, l_n)$  при котором равенство

$$E\left(x, \sum_{i=1}^n \alpha_i l_i\right) = 1$$

выполнялось для каждого  $x \in R^m$  хотя бы при каком-нибудь наборе коэффициентов  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ . А это как раз и означает, что предикат  $E$  не  $n$ -мерен.

2. Докажем, что из рефлексивности, симметричности, транзитивности, однородности и  $n$ -мерности не следует аддитивность предиката  $E$ . Выберем предикат  $E$  следующим образом:

$$E(x, y) = D(F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x)), (F_1(y), F_2(y), \dots, F_n(y))). \quad (1)$$

Здесь  $F_i: R^m \rightarrow R^1$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) — это функции, определенные следующим образом:

$$F_i(x) = \begin{cases} \xi_i, & \xi_{n+1} = 0 \\ 2\xi_i, & \xi_{n+1} \neq 0. \end{cases} \quad (2)$$

Символом  $D$  обозначен предикат равенства, заданный на  $R^n \times R^n$ . Явно видно, предикат  $E$  рефлексивен, симметричен и транзитивен. Он также однороден. Действительно, пусть  $\alpha$  выбрано произвольно. Если вектор  $x$  выбран так, что его координата  $\xi_{n+1} = 0$ , то согласно (2)  $F_i(\alpha x) = \alpha \xi_i = \alpha F_i(x)$ . Если же  $x$  выбран так, что для него  $\xi_{n+1} \neq 0$ , то  $F_i(\alpha x) = 2\alpha \xi_i = \alpha \cdot 2 \cdot \xi_i = \alpha F_i(x)$ . Следовательно, функции  $F_i(x)$  однородны. Из этого только что полученного результата определения (1) предиката  $E$  выведем, что для любых  $x, y$  и  $\alpha$  условия  $E(x, y) = 1$  следует  $E(\alpha x, \alpha y) = 1$ .

Докажем  $n$ -мерность предиката  $E$ . Имеем

$$\sum_{k=1}^n F_k(x) p_k = F_1(x) p_1 + F_2(x) p_2 + \dots + F_n(x) p_n + 0 \cdot p_{n+1} + \dots + 0 + p_m.$$

Записанный вектор представим в виде набора его координат

$$\sum_{k=1}^n F_k(x) p_k = (F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x), 0, \dots, 0).$$

Эта координата  $n+1$ -я координата равна нулю. Таким образом, согласно (2), находим

$$F_i \left( \sum_{k=1}^n F_k(x) p_k \right) = F_i(x)$$

для любого  $i=1, 2, \dots, n$ . С помощью определения (1) предиката  $E$  из этого только что полученной системы равенств выведем

$$E \left( x, \sum_{k=1}^n F_k(x) p_k \right) = 1. \quad (3)$$

Коэффициенты  $F_k(x)$  при векторах  $p_k$  в (3) однозначно определяются выбором вектора  $x$ . Следовательно, существует набор векторов  $(p_1, p_2, \dots, p_n)$  такой, что равенство (3) выполняется для каждого  $x$  при единственном наборе коэффициентов  $(F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x))$ . Вместе с тем предикат  $E$  не аддитивен. Действительно, пусть  $x = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m)$ ,  $y = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m)$ , причем  $\xi_i \neq 0$  ( $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ),  $\xi_{n+1} = 0$ ,  $\eta_{n+1} \neq 0$ . Тогда согласно (2)  $F_i(x+y) = 2(\xi_i + \eta_i)$ ,  $F_i(x) + F_i(y) = \xi_i + 2\eta_i$ . Следовательно, для так выбранных  $x$  и  $y$   $F_i(x+y) \neq F_i(x) + F_i(y)$ .

3. Докажем, что из рефлексивности, симметричности, транзитивности, аддитивности и  $n$ -мерности не следует однородность предиката  $E$ . Выберем предикат  $E$  следующим образом:

$$E(x, y) = D(F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x)), (F_1(y), F_2(y), \dots, F_n(y)))$$

Здесь функции  $F_i (i=1, 2, \dots, n)$  для любого  $x = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m)$  принимают значения

$$F_i(x) = \xi_i + f(\xi_{n+1}). \quad (1)$$

В роли функции  $f$  используем какую-нибудь аддитивную, но не однородную вещественную функцию вещественного аргумента.

Для вектора

$$\sum_{k=1}^n F_k(x) p_k$$

коэффициент  $F_i(x)$  играет роль  $i$ -й его координаты, а  $n+1$ -я координата этого вектора равна нулю. Следовательно, согласно (1) имеем

$$F_i\left(\sum_{k=1}^n F_k(x) p_k\right) = F_i(x) + f(0).$$

Для любой аддитивной функции  $f(0) = 0$ , поэтому

$$F_i\left(\sum_{k=1}^n F_k(x) p_k\right) = F_i(x).$$

По определению (4) предиката  $E$  последняя система равенств означает, что

$$E\left(x, \sum_{k=1}^n F_k(x) p_k\right) = 1.$$

Отсюда непосредственно следует, что предикат  $E$   $n$ -мерен, кроме того, рефлексивен, симметричен и транзитивен. Координаты  $\xi_i(x)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) вектора  $x$  являются аддитивными функциями аргумента  $x$ . Поэтому функции  $F_k(x)$  ( $k=1, 2, \dots, n$ ), согласно определению (5), аддитивны. Вместе с ними аддитивен и предикат  $E$ , определяемый равенством (4). Однако в силу неоднородности функции  $f$  неоднородны также и функции  $F_k(x)$ . Следовательно, неоднороден и предикат  $E$ .

4. Докажем, что из транзитивности, аддитивности, однородности и  $n$ -мерности предиката  $E$  не вытекает его симметричности. Выберем предикат  $E$  следующим образом:

$$E(x, y) = D((\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n, 0), (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n, \eta_{n+1})). \quad (6)$$

Возьмем  $x$  и  $y$  такие, что  $\xi_i = \eta_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ),  $\xi_{n+1} \neq 0$ ,  $\eta_{n+1} = 0$ . Тогда  $E(x, y) = 1$ , тем не менее  $E(y, x) = 0$ . Отсюда следует, что предикат  $E$  несимметричен. Вместе с тем предикат  $E$  транзитивен. Действительно, пусть  $E(x, y) = E(y, z) = 1$ . Тогда  $\xi_i = \eta_i = \zeta_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ),  $\eta_{n+1} = \zeta_{n+1} = 0$ . Следовательно,  $E(x, z) = 1$ . Предикат  $E$  аддитивен. Действительно, пусть  $x, x', y, y'$  таковы, что

$x, y) = E(x', y') = 1$ . Тогда  $\xi_i = \eta_i, \xi'_i = \eta'_i, \xi_i + \xi'_i = \eta_i + \eta'_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $\eta_{n+1} = \eta'_{n+1} = 0, \eta_{n+1} + \eta'_{n+1} = 0$ . Следовательно,  $E(x + x', y + y') = 1$ .

Для доказательства однородности предиката  $E$  произвольно выберем  $x$  и  $y$  так, чтобы  $E(x, y) = 1$ . Тогда  $\xi_i = \eta_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $\eta_{n+1} = 0$ . При любом  $\alpha$  имеем  $\alpha\xi_i = \alpha\eta_i, \alpha\eta_{n+1} = 0$ . Отсюда вытекает, что  $E(\alpha x, \alpha y) = 1$ . Докажем, что предикат  $E$   $n$ -мерен. Для любого  $x$  принимаем  $F_i(x) = \xi_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Тогда

$$\sum_{i=1}^n F_i(x) p_i = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n, 0, \dots, 0).$$

Следовательно, согласно (6), имеем:

$$E\left(x, \sum_{i=1}^n F_i(x) p_i\right) = 1,$$

причем при любом другом наборе коэффициентов, стоящих при  $p_i$ , последнее равенство не выполняется.

5. Докажем, что из симметричности, аддитивности, однородности и  $n$ -мерности не следует транзитивность предиката  $E$ . Выберем предикат  $E$  следующим образом:

$$E(x, y) = D((\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) (-\eta_1, -\eta_2, \dots, -\eta_n)). \quad (7)$$

Очевидно, что этот предикат симметричен, аддитивен и однороден. Он также  $n$ -мерен. Действительно, примем для любого  $x$   $F_i(x) = -\xi_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Тогда

$$E\left(x, \sum_{i=1}^n F_i(x) p_i\right) = 1,$$

причем ни при каком другом наборе коэффициентов при векторах  $p_i$  это равенство не выполняется. Вместе с тем предикат  $E$  не транзитивен. В самом деле, пусть  $x, y, z$  таковы, что  $E(x, y) = E(y, z) = 1$ , причем  $x \neq 0$ . Тогда  $\xi_i = -\eta_i, \eta_i = -\xi_i, \xi_i = \xi_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Согласно определению (7) предиката  $E$  имеем  $E(x, z) = 0$ .

На этом доказательство теоремы 1 заканчивается. Из только что доказанных пяти утверждений непосредственно вытекает, что из свойств рефлексивности, симметричности, транзитивности однородности и  $n$ -мерности другие несократимые системы характеристических свойств линейного предиката, кроме тех, которые указаны в теоремах 2 и 3, образовать невозможно.

Остался нерассмотренным вопрос о несократимых системах характеристических свойств линейного предиката в случае, когда  $n = m$ . На него дают ответ теоремы 2÷4.

**Теорема 2.** Для того, чтобы при  $n = m$  предикат  $E$  был линейным, необходимо и достаточно, чтобы он обладал свойствами рефлексивности и  $n$ -мерности.

Доказательство. При  $n=m$  любые векторы  $x$  и  $y$  выражаются через линейно независимые векторы  $l_1, l_2, \dots, l_n$ :

$$x = \sum_{i=1}^n \alpha_i l_i, \quad y = \sum_{i=1}^n \beta_i l_i.$$

Предположим, что  $E(x, y) = 1$ . Тогда

$$E\left(x, \sum_{i=1}^n \beta_i l_i\right) = 1.$$

В силу рефлексивности предиката  $E$  для любого  $x$  имеем  $E(x, x) = 1$ , иначе говоря

$$E\left(x, \sum_{i=1}^n \alpha_i l_i\right) = 1.$$

Согласно свойству  $n$ -мерности  $\alpha_i = \beta_i$  при любом  $i=1, 2, \dots, n$ . Это означает, что  $x=y$ . Очевидно также, что из  $x=y$  вытекает  $E(x, y) = 1$ . Следовательно,  $E$  — это предикат равенства:  $E(x, y) = D(x, y)$ . Он обладает свойствами симметричности, транзитивности, аддитивности и однородности. Теорема доказана.

**Теорема 3.** Для того чтобы при  $n=m$  предикат  $E$  был линейным, необходимо и достаточно, чтобы он обладал свойствами симметричности, транзитивности и  $n$ -мерности.

Доказательство. Согласно доказанному в теореме 2, рефлексивность вытекает из симметричности, транзитивности и  $n$ -мерности предиката  $E$ . По теореме 2 устанавливаем линейность предиката  $E$ . Теорема доказана.

**Теорема 4.** При  $n=m$  системы характеристических свойств линейного предиката  $E$ , фигурирующие в теоремах 2, 3, несократимы.

Доказательство. Будем, как и в теореме 1, в роли векторного пространства  $M$  использовать арифметическое пространство  $R^m (m \geq 1)$ . Покажем, что рефлексивность предиката  $E$  не следует из его  $n$ -мерности. Пусть  $E(x, y) = D(x, y)$ . Очевидно, что этот предикат  $n$ -мерен, но не рефлексивен. Покажем, далее, что  $n$ -мерность предиката  $E$  не следует из его рефлексивности. В роли предиката  $E$  принимаем предикат  $E(x, y)$ , равный единице при любых  $x$  и  $y$ . Предикат  $E$  в этом случае, очевидно, рефлексивен. Однако он не  $n$ -мерен, поскольку при любом наборе векторов  $(l_1, l_2, \dots, l_n)$  существует бесконечно много вещественных чисел  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$  таких, что

$$E\left(x, \sum_{i=1}^n \alpha_i l_i\right) = 1.$$

Докажем, что симметричность предиката  $E$  не следует из его транзитивности и  $n$ -мерности. Положим

$$E(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } y = 0 \\ 0, & \text{если } y \neq 0. \end{cases}$$

Предикат  $E$  транзитивен, если  $E(x, y) = E(y, z) = 1$ , т. е.  $z = 0$ , следовательно  $E(x, z) = 1$ . Он также  $n$ -мерен. Действительно, при любом  $x$   $E(x, y) = 1$  только при  $y \neq 0$ . Вместе с тем вектор  $0$  выражается в любом базисе  $(l_1, l_2, \dots, l_n)$  по формуле

$$0 = \sum_{i=1}^n \alpha_i l_i$$

с помощью единственно возможного набора коэффициентов  $\alpha_i = 0$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Следовательно, равенство

$$E\left(x, \sum_{i=1}^n \alpha_i(x) l_i\right) = 1,$$

для любого  $x$  выполняется при единственном наборе коэффициентов  $(\alpha_1(x), \alpha_2(x), \dots, \alpha_n(x))$ . Однако предикат  $E$  несимметричен, поскольку при  $a \neq 0$   $E(a, 0) = 1$ , но  $E(0, a) = 0$ . Докажем, что транзитивность предиката  $E$  не следует из его симметричности и  $n$ -мерности. Положим  $E(x, y) = D(x, -y)$ . Очевидно, что такой предикат симметричен,  $n$ -мерен, но не транзитивен. Наконец, установим, что  $n$ -мерность предиката  $E$  не следует из его симметричности и транзитивности. Положим  $E(x, y) = 1$ . Этот предикат симметричен и транзитивен, но не  $n$ -мерен, так как существует бесконечно много наборов  $(\alpha_1(x), \alpha_2(x), \dots, \alpha_n(x))$  таких, что

$$E\left(x, \sum_{i=1}^n \alpha_i(x) l_i\right) = 1,$$

где  $(l_1, l_2, \dots, l_n)$  — какой-нибудь базис. Теорема доказана.

Можно ли утверждать, что системы характеристических свойств линейного предиката теперь упрощены до предела? Нет, поскольку не были использованы возможности упрощения каждого из свойств, входящих в эти системы. О том, что такие возможности имеются, свидетельствует следующая ниже теорема 3.8. Пусть  $E$  — предикат, заданный на  $M \times M$ , где  $M$  — какое-нибудь векторное пространство над некоторым полем  $G$  с базисом  $(p_1, p_2, \dots, p_n)$ . Предикат  $E$  назовем примитивно рефлексивным, если для любого  $k = 1, 2, \dots, t$  справедливо равенство  $E(p_k, p_k) = 1$ . Предикат  $E$  назовем примитивно  $n$ -мерным, если существует набор векторов  $(l_1, l_2, \dots, l_n)$  такой, что равенства

$$E\left(p_k, \sum_{i=1}^n H_i(p_k) l_i\right) = 1 \quad (8)$$

выполняются для каждого  $k = 1, 2, \dots, t$  при единственном наборе коэффициентов  $(H_1(p_k), H_2(p_k), \dots, H_n(p_k))$ . Здесь  $H_1, H_2, \dots, H_n$  — это некоторые функции, заданные на множестве  $\{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  со значениями в множестве  $G$ .

**Теорема 5.** Для того чтобы предикат  $E$  был линейным, необходимо и достаточно, чтобы он обладал свойствами примитивной

рефлексивности, аддитивности, однородности и примитивной  $n$ -мерности.

Доказательство. Для доказательства теоремы достаточно из свойств, перечисленных в теореме, вывести рефлексивность и  $n$ -мерность предиката  $E$ , а затем сослаться на теорему 3 [1]. Выведем рефлексивность. Возьмем произвольный вектор  $x$  и выразим его в виде

$$x = \xi_1 p_1 + \xi_2 p_2 + \dots + \xi_m p_m.$$

Здесь  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m$  — координаты вектора  $x$ . Из ограниченной рефлексивности и аддитивности предиката  $E$  выводим

$$E(\xi_1 p_1, \xi_1 p_1) = E(\xi_2 p_2, \xi_2 p_2) = \dots = E(\xi_m p_m, \xi_m p_m) = 1.$$

Применяя  $m-1$  раз к полученным равенствам свойство аддитивности предиката  $E$ , получаем

$$E(\xi_1 p_1 + \xi_2 p_2 + \dots + \xi_m p_m, \xi_1 p_1 + \xi_2 p_2 + \dots + \xi_m p_m) = 1,$$

т. е.  $E(x, x) = 1$ .

Выведем  $n$ -мерность. Рассмотрим уравнение

$$E\left(0, \sum_{i=1}^n \gamma_i t_i\right) = 1 \quad (9)$$

относительно неизвестного набора коэффициентов  $(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n)$ . Здесь  $(l_1, l_2, \dots, l_n)$  — фиксированный набор векторов, фигурирующий в условии примитивной  $n$ -мерности предиката  $E$ . Докажем что уравнению (9) удовлетворяет единственный набор коэффициентов  $(0, 0, \dots, 0)$ . Действительно, пользуясь свойством аддитивности предиката  $E$ , из (8) и (9) выводим

$$E\left(p_k, \sum_{i=1}^n (H_i(p_k) + \gamma_i) l_i\right) = 1 \quad (k = 1, 2, \dots, m).$$

Сравнивая полученные равенства с равенствами (8), с учетом единственности коэффициентов при векторах  $l_i$  получаем по условию примитивной  $n$ -мерности:  $H_i(p_k) = H_i(p_k) + \gamma_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Отсюда следует  $\gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_n = 0$ .

Пусть  $x$  — произвольный вектор с координатами  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m$ . Обозначим

$$F_i(x) = \sum_{k=1}^m \xi_k H_i(p_k) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

и докажем, что при таком выборе функций  $F_1, F_2, \dots, F_n$  имеет место равенство (26) [2]. Действительно, из однородности и ограниченной  $n$ -мерности предиката  $E$  выведем

$$E\left(\xi_k p_k, \sum_{i=1}^n \xi_k H_i(p_k) l_i\right) = 1 \quad (k = 1, 2, \dots, m).$$

Применение свойства аддитивности предиката  $E$  к только что полученной системе равенств дает

$$E \left( \sum_{k=1}^m \xi_k p_k, \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \xi_k H_i(p_k) l_i \right) = 1,$$

$$E \left( x, \sum_{i=1}^m l_i \sum_{k=1}^m \xi_k H_i(p_k) \right) = 1.$$

Подставляя  $F_i(x)$  по (10) в последнее равенство, приходим к равенству (26) [2]. Это означает, что набор коэффициентов  $(F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x))$ , фигурирующий в законе  $n$ -мерности, существует.

Осталось доказать единственность этого набора. Предположим, что имеются два набора  $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$  и  $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)$ , для которых выполняются равенства

$$E \left( x, \sum_{i=1}^n \mu_i l_i \right) = 1, \quad E \left( x, \sum_{i=1}^n \varepsilon_i l_i \right) = 1.$$

Из предпоследнего равенства с помощью свойства однородности предиката  $E$  выведем

$$E \left( -x, \sum_{i=1}^n (-\mu_i l_i) \right) = 1.$$

Применим к двум последним равенствам свойство аддитивности предиката  $E$ :

$$E \left( 0, \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \mu_i) l_i \right) = 1.$$

По доказанному ранее имеем  $\varepsilon_i - \mu_i = 0$  при всех  $i = 1, 2, \dots, n$ . Отсюда следует равенство наборов  $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$  и  $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)$ . Итак, набор коэффициентов  $(F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x))$ , фигурирующий в равенстве (26) работы [2], существует и единственен, т. е. свойство  $n$ -мерности предиката  $E$  выполняется. Теорема доказана.

Поступила в редколлегию 30.12.88

**Список литературы:** 1. Бондаренко М. Ф., Шабанов-Кушнаренко С. Ю. Об условиях существования субъективной метрики//Пробл. бионики. 1989. Вып. 42. С. 3—9. 2. Бондаренко М. Ф., Шабанов-Кушнаренко С. Ю. О линейных предикатах//Пробл. бионики. 1989. Вып. 43. С. 3—7.

Поступила в редколлегию 08.08.88

**О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СЛОВООБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СЕМАНТИКИ ЦЕПОЧКИ СУФФИКСАЛЬНЫХ МОРФОВ**

Задача математического описания смысла производного слова может быть решена после формализации деривационного анализа. Сложность решения этой задачи состоит в том, что смысл производной лексической единицы представляет собой в общем случае не простую сумму смыслов элементов деривата, а некоторую функцию, аргументами которой являются смыслы производящей основы и словообразовательного аффикса. В настоящей статье сделана попытка определения смысла многоаффиксных производных, и как первый шаг в этом направлении — определение словообразовательного значения, мотивируемого цепочкой суффиксов. Основу категориальной семантики производного слова составляет словообразовательное значение, мотивируемое аффиксом. Словообразовательная семантика, актуализируемая деривационной морфемой, обычно общая для некоторого класса производных, представляет собой некую семантическую константу. Зная конкретное словообразовательное значение аффикса и семантику мотивирующей основы, можно получить смысл производной лексической единицы. Для этого нужно конкретизировать словообразовательную семантику ссылкой на семантику производящей основы. В случае многоаффиксной производной единицы описанные действия производят несколько раз (для каждого морфа), причем определение словообразовательного значения цепочки аффиксов начинают с первого от основы морфа.

Основной единицей классификации словообразовательных значений является словообразовательный тип (СТ) [1]. Это некая схема построения слов, абстрагированная от конкретных лексических единиц, характеризующаяся общностью трех элементов: частью речи производящей основы; семантическим соотношением между производными и производящими; формальным соотношением между производными и производящими, а именно, тождественностью аффикса при аффиксальном словообразовании (здесь и в дальнейшем нас будет интересовать лишь лексическая деривация, несущая в себе полную трансформацию лексического значения производящего в отличие от синтаксической деривации). Общее значение, отличающее все мотивированные единицы данного типа от мотивирующих, называют словообразовательным значением (СЗ) производных слов этого типа. Содержательно интерпретировать СЗ удобно как сумму некоего инвариантного смысла суффикса и семантических добавлений [2].

Важнейшими характеристиками типа принято считать регулярность и продуктивность. Однако в ряде случаев можно говорить и о продуктивности суффикса, понимая под этим его способность

участвовать в различных словообразовательных моделях, характеризующихся сменой мотивирующих частей речи: существительное → существительное, глагол → существительное, прилагательное → существительное. Можно привести ряд морфем, способных образовывать дериваты от двух частей речи, встречаются также словообразовательные морфемы, способные участвовать в трех словообразовательных моделях: *утиль-щик, выдум-щик, паркетчик, потат-чик; греб-ец, краснодерев-ец, юн-ец*. Формальная модель морфемы <щик> (ее морфы-чик/-щик) записывается в виде уравнения алгебры конечных префикатов [3]:

$$S_1^- \overset{m}{s}_{21} \overset{m}{s}_{22} \overset{m}{s}_{23} \overset{m}{s}_{31} \overset{m}{s}_{32} \overset{m}{s}_{33} \overset{m}{s}_4^- \vee S_1^- \overset{m}{s}_{21} \overset{m}{s}_{22} \overset{m}{s}_{23} \overset{m}{s}_{31} \overset{m}{s}_{32} \overset{m}{s}_{33} \overset{m}{s}_4^- \vee \\ \vee s_{11}^n s_{12}^n s_{13}^- \overset{m}{s}_{21} \overset{m}{s}_{22} \overset{m}{s}_{23} \overset{m}{s}_{31} \overset{m}{s}_{32} \overset{m}{s}_{33} \overset{m}{s}_4^- \sim M^l, \quad (1)$$

где  $s_{ij}$  — сегмент лингвистического регистра сегментированных суффиксов,  $i$  — номер сегмента регистра,  $j$  — номер позиции в сегменте,  $M^l$  — словообразовательная морфема с порядковым номером  $l$ . Таким образом можно говорить о морфеме, способной соединяться с основами, имеющими различную частеречную принадлежность.

При исследовании различных словообразовательных типов было замечено, что одним из решающих факторов, влияющих на изменение смысла семантического инварианта аффикса, является частеречная принадлежность мотивирующей основы, например: основа прилагательное — *дик-арь* — «лицо, мужской пол, характеризуется отношением к признаку»; основа глагол — *звон-арь* — «лицо, мужской пол, характеризуется отношением к действию»; основа существительное — *пушк-арь* — «лицо, мужской пол, характеризуется отношением к предмету». Внутри словообразовательной модели инвариант имеет некоторое постоянство. Таким образом, видно, что охарактеризовать суффикс полностью можно только в том случае, если охарактеризована его словообразовательная модель либо модели. Последнее возможно, «... если в описание суффикса включены все данные о сочетающихся с ним основах» [1]. Только тогда прояснится полная картина вариации словообразовательного значения, включающая как информацию о дополнительных элементах смысла, так и о семантическом инварианте аффикса.

В русском языке имеется ряд суффиксов, способных в одном случае выступать неким носителем категориального значения, актуализируя при этом и дополнительную семантику, в другом — выступать в качестве элемента, модифицирующего семантику производящей основы минимально, привнося лишь один оттенок смысла «женскость», «фамильярность» и т. д. Например: *ззнай-ка, побирущ-ка* — «лицо, общий род, субъект действия, просто производит действие»; *смугл-янка, резв-ушка* — «лицо, женский пол, характеризуется отношением к признаку, внешний признак»; *шпионка, цыган-ка* — «женскость». Сказанное выше свидетельствует о необходимости серьезного учета информации об основе на каж-

дом этапе анализа деривата. Допустим, что удалось организовать классы основ по критерию принадлежности к одному словообразовательному типу. При этом учитываются словообразовательные свойства мотивирующих единиц и их способность сочетаться с деривационными аффиксами. Тогда для определения семантики производной лексической единицы необходимо произвести следующие шаги. 1. Расчленив дериват на словообразующий аффикс и мотивирующую основу. 2. Определить морфемную принадлежность аффикса. 3. Зная морфему, найти группу семантических классов основ, с которыми эта морфема может соединяться. 4. Пользуясь текстом основы, найти ее семантический класс. 5. Определить словообразовательное значение аффикса и смысл производного слова, пользуясь семантикой основы и текстом суффиксальной морфемы.

Исследуем производящие основы одного семантического класса с точки зрения их производности. Оказывается, что в одном случае в качестве мотивирующих могут выступать немотивированные лексические единицы, в другом случае — суффиксальные: *цыган* — *цыганка*, *грузин* — *грузинка*. Таким образом, в одном случае мотивирующую основу можно найти в машинном словаре корневых морфем (и модифицировать ее, например, семой «женскость», как в нашем примере), в другом случае основа производная и, следовательно, возникает проблема определения ее смысла. Напомним, что производные основы «физически» не хранятся в памяти ЭВМ. Они находятся там лишь формально, т. е. могут быть получены в процессе словообразования посредством некоторой формальной операции. Поэтому их объединение в один семантический класс с корневыми морфемами носит тоже чисто формальный характер.

Итак, при анализе многослойного (многосуффиксного в данном случае) деривата возникает проблема определения семантики производной основы и проблема определения ее словообразующих свойств: задача определения ее принадлежности к тому или иному семантическому словообразовательному классу. Как показано выше, производные и непроизводные лексические единицы могут обладать одинаковыми словообразовательными свойствами. Объединим их в один семантический словообразовательный класс, причем непроизводные лексические единицы будут реальными членами класса, а производные — формальными. Словообразовательные свойства производящей основы, т. е. принадлежность словообразовательному классу, будем определять одновременно с ее семантикой. Исходным материалом в этой задаче считаем очередной словообразующий аффикс и мотивирующую основу, получаемые на очередном шаге препарации. На языке алгебры конечных предикатов этот процесс описывается следующим образом [3]:

$$M^l k_l^n \sim k_n^n, \quad (2)$$

$$M^l k_l^n \sim x_1^n \cdot x_2^n \cdot \dots \cdot x_n^n: x_1^n \cdot x_2^n \cdot \dots \cdot x_n^n = r^n, \quad (3)$$

где  $M^l$  — морфема, имеющая условный номер  $l$ ;  $k_l^n$  — семантический класс  $n$  внутри группы основ, соединяющихся с морфемой  $l$ ;

$k_p^q$  — семантический класс  $q$  внутри группы основ, соединяющихся с морфемой  $p$ ;  $x_i^{z_i}$  — семантические оттенки,  $\sigma_i$  — значения оттенков смысла;  $r^n$  —  $n$ -я семантическая роль суффиксальной морфемы.

Уравнение (2) содержательно интерпретируется таким образом: если основа, находящаяся в семантическом классе  $n$ , принадлежащем морфеме  $l$ , соединится в процессе словообразования с одним из морфов морфемы  $M^l$ , то образуется дериват, который потенциально может соединиться с морфемой, имеющей номер  $p$ , попадая при этом в словообразовательный класс  $q$  морфемы  $M^p$ . Уравнения (3) описывают семантическую роль  $r^n$  в виде набора оттенков смысла [2], которая актуализируется, если основа семантического класса  $n$  соединится с одним из морфов морфемы с номером  $l$ . Заметим, что в семантический словообразовательный класс  $q$  ( $k_p^q$ ) морфемы  $p$  могут потенциально попасть дериваты, образованные различными путями, т. е. посредством соединения основ с морфами разных морфем и в результате соединения с морфами одной морфемы из разных ее словообразовательных классов.

Анализ деривата необходимо начинать с препарации последнего словообразовательного морфа. Процесс препарации продолжается до тех пор, пока последняя мотивирующая основа будет ничем иным, как корнем. Корни машинного словаря снабжены наборами помет, которые объединяют их по семантическим словообразовательным признакам в классы. Поскольку любая производная единица в результате препарации может быть расчленена на корень и аффиксы, то, зная текст первого словообразовательного аффикса и семантический класс корневого морфа, можно определить словообразовательное значение и словообразовательные свойства первой мотивирующей основы, полученной на этом деривационном шаге. Процесс моделирования словообразования будет повторяться до тех пор, пока не присоединится последний словообразовательный аффикс.

Таким образом, определение словообразовательной семантики сводится к последовательной препарации и затем моделированию процесса словообразования с определением семантических словообразовательных классов, к которым принадлежат основы, участвующие в каждом очередном шаге суффиксации. Осуществив морфную препарацию деривата, последовательно восстанавливаем семантическую предысторию всех деривационных шагов (путем последовательного наращивания семантики). Последнее обстоятельство позволяет пошагово определять словообразовательный смысл очередного морфа и словообразовательные свойства основы. Полная словообразовательная семантика аффиксальной цепочки многослойного деривата определяется, как видно, на последнем шаге.

В семантическом словообразовательном классе могут содержаться производные и производные лексические единицы. С учетом этого обстоятельства сформулируем алгоритм определения

семантики многослойного суффиксального деривата. 1. Отсекаем первый словообразующий аффикс. 2. Определяем морфему, к которой принадлежит этот аффикс. 3. Устанавливаем группу классов основ по частеречной принадлежности, и класс, с основами которого может соединиться эта морфема (номер класса  $l$  совпадает с порядковым номером морфемы  $M^l$ ). 4. Пользуясь текстом основы, находим номер  $n$  семантического класса  $k_n^l$ , к которому она принадлежит; если класс не найден, выполняем п. 5, в противном случае — п. 6. 5. Отсекаем очередной словообразующий аффикс и переходим к выполнению п. 2; если отсечение аффикса невозможно, считаем, что исследуемое слово «потенциально», переходим на специальную ветку алгоритма (определению смысла потенциальных слов будет посвящена отдельная статья). 6. Определяем словообразовательное значение, мотивируемое первым словообразующим суффиксом, и семантический класс, в который потенциально может перейти основа, если к ней будет присоединен следующий словообразовательный морф. 7. Соединяем очередной аффикс с основой, повторяем выполнение п. 6; если аффикс последний, процесс моделирования семантики закончен. Таким образом, в памяти ЭВМ могут храниться производные лексические единицы и их семантика. Вся языковая информация записывается в виде уравнений алгебры конечных предикатов, с которыми и оперирует вычислительная машина. Приведем примеры реальных машинных уравнений, описывающих переход производных из одного семантического класса в другой. Рассмотрим морфему -к(а) ( $M^{23}$ ). Объединение морфов в морфему  $M^{23}$  записывается с помощью следующего уравнения алгебры конечных предикатов:

$$\begin{aligned} S_1^- s_{31}^- s_{32}^- s_{33}^- s_4^- (s_{21}^0 s_{22}^B s_{23}^- \vee s_{21}^A s_{22}^H s_{23}^- \vee s_{21}^H s_{22}^U s_{23}^- \vee \\ \vee s_{21}^A s_{22}^U s_{23}^- \vee s_{21}^V s_{22}^{III} s_{23}^- \vee s_{21}^A s_{22}^{III} s_{23}^- \vee s_{21}^H s_{22}^{III} s_{23}^- \vee \\ \vee s_{21}^H s_{22}^H s_{23}^- \vee s_{21}^H s_{22}^H s_{23}^-) = M^{23}. \end{aligned} \quad (4)$$

Условия потенциального перехода производных, образованных с помощью словообразовательных морфем  $M^1, M^7, M^{15}, M^{16}, M^{20}$  в класс  $R_{23}^{80}$  морфемы  $M^{23}$ , запишутся в виде:

$$M^1 (k_1^3 \vee k_1^{23} \vee k_1^{24} \vee k_1^{25} \vee k_1^{26} \vee k_1^{27} \vee k_1^{28} \vee k_1^{51} \vee k_1^{53} \vee \\ \vee k_1^{55} \vee k_1^{56} \vee k_1^{57} \vee k_1^{58} \vee k_1^{59} \vee k_1^{60} \vee k_1^{61} \vee k_1^{64} \vee k_1^{68} \vee k_1^{70} \vee k_1^{71}) \sim k_{23}^{80}, \quad (5)$$

$$M^7 (k_7^1 \vee k_7^{33} \vee k_7^{35} \vee k_7^{59} \vee k_7^{64} \vee k_7^{66}) \sim k_{23}^{80}, \quad (6)$$

$$M^{15} (k_{15}^{22} \vee k_{15}^{23} \vee k_{15}^{63} \vee k_{15}^{66}) \sim k_{23}^{80}, \quad (7)$$

$$M^{16} (k_{16}^1 \vee k_{16}^8 \vee k_{16}^{34} \vee k_{16}^{59} \vee k_{16}^{60} \vee k_{16}^{64} \vee k_{16}^{71} \vee k_{16}^{72} \vee k_{16}^{73}) \sim k_{23}^{80}, \quad (8)$$

$$M^{20} (k_{20}^8 \vee k_{20}^{60} \vee k_{20}^{64} \vee k_{20}^{69} \vee k_{20}^{70}) \sim k_{23}^{80}. \quad (9)$$

Если любой дериват из класса  $k_{23}^{80}$  соединится с морфемой  $M^{23-k}(a)$ , то всякая семантическая роль, актуализируемая морфемами  $M^1, M^7, M^{15}, M^{16}, M^{20}$ , в этом классе будет модифицирована семой «женскость»

$$M^{23} k_{23}^{80} \sim x_5^*, \quad (10)$$

где  $x_5^*$  — оттенок «женскость». Рассмотрим пример. Пусть в деривате *мотоцикл-ист-ка* проведены морфемные швы. Корень *мотоцикл-* относится к семантическому классу  $k_1^3$  морфемы  $M^1$  (*-ист*). В результате соединения этого корня с морфемой  $M^1$  полученный дериват перейдет в словообразовательный класс  $k_{23}^{80}$  (см. уравнение (5)). Одновременно актуализируется семантическая роль  $r^3$ :  $M^1 k_1^3 \sim r^3$  и  $M^1 k_1^3 \sim k_{23}^{80}$ . При соединении основы *мотоциклист-* с морфом *-к(а)* семантическая роль  $r^3$  модифицируется семой «женскость»:  $M^{23} k_{23}^{80} \sim x_5^*$ .

**Список литературы:** 1. Принципы и методы семантических исследований. М., 1976. 266 с. 2. Левицкий А. С., Шаронова Н. В., Рябова Н. В. О математическом моделировании деривационного анализа суффиксальных существительных со значением лица//К., 1988. 15 с. Деп. в УкрНИИНТИ. 15.03.88. № 1313-Ук88. 3. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Теория интеллекта. Математические средства. К., 1984. 144 с.

Поступила в редколлегию 11.04.88.

УДК 652.22

С. Н. ГЕРАСИН, Е. Б. КАЙКОВА, В. Я. ТЕРЗИЯН, канд. техн. наук

### ИНТЕРВАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОБРАБОТКЕ ЭКСПЕРТНЫХ МНЕНИЙ. МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ОТСЕЧЕНИЙ

В условиях неопределенности для принятия решений широко используется метод экспериментального оценивания. Обычно решались две задачи: сбор экспертной информации (в этом плане разрабатывается метод Дерби [1]) и обработка оценок экспертов с целью получения из субъективной информации какого-либо объективного результата. Основой для решения второй задачи служит метод статистического точечного оценивания [2]. По-видимому, такой подход к обработке экспертных мнений не единственен. Действительно, предположим, что эксперт оценивает некоторый числовой параметр системы, причем вместо точечной оценки он определяет интервал, в который, по его мнению, попадает данный параметр. Сам эксперт, т. е. любой носитель субъективного мнения, обладает некоторой суммой знаний о параметре, поэтому очевидно, что чем выше квалификация эксперта, тем уже интервал мнений.

Рассмотрим следующую задачу. Требуется определить значение некоторого параметра  $X$ . Предположим, что изменение точечного

значения данного параметра  $X_0$  затруднено по ряду причин. Для оценки параметра привлекается группа из  $n$  экспертов. Каждый  $i$ -й эксперт из этой группы дает числовой интервал  $[a_i, b_i]$ , в который, по его мнению, попадает значение  $X_0$ . Каждый эксперт должен гарантировать принадлежность  $X_0$  выбранному им интервалу и при этом стремиться определить интервал как можно меньшей длины. Понятно, что чем выше квалификация эксперта, тем меньше он даст интервал, гарантирующий попадание в него значения  $X_0$ . Рассмотрим случай, когда условия оценивания параметра всеми экспертами одинаковы, т. е. внешние воздействия в одинаковой степени влияют на принятие решения каждым экспертом. Задача заключается в следующем. Необходимо найти процедуру обработки мнений группы экспертов, позволяющую с учетом внешних воздействий на экспертов с большой степенью точности оценить значение исследуемого параметра  $X$ . Цель данной работы — решение приведенной задачи и некоторых ее приложений.

Традиционное решение поставленной задачи наглядно можно представить следующим образом. Расположенные в порядке убывания длин однородные пластины, концы которых соответствуют координатам отрезков экспертных оценок, накладываются друг на друга. Координату центра тяжести полученной системы можно принять за результат обработки экспертных мнений. Очевидно, что подобный подход нарушает условие принадлежности объективной точечной оценки каждому субъективному интервалу. Видно также, что результат смещен относительно середины наименьшего отрезка в сторону удлинения «левых» частей мнений менее квалифицированных экспертов, хотя логично предположить, что такое удлинение является результатом внешних воздействий на мнение экспертов. Как уже говорилось, длина отрезка-мнения уменьшается с увеличением квалификации эксперта и стремится к объективной точечной оценке  $X_0$  при стремлении к бесконечности квалификации эксперта. Поэтому в рассмотренном примере логично было бы соединить кривой левые концы отрезков, расположив их параллельно на одинаковом расстоянии друг от друга в порядке убывания длин, и аналогично поступить с правыми концами отрезков. Затем проследить за поведением этих двух кривых за пределами наименьшего отрезка и найти их точку пересечения. Теперь с большей степенью вероятности можно утверждать, что координата точки пересечения этих кривых является решением поставленной задачи и лежит правее середины наименьшего отрезка, в отличие от предыдущего подхода, и принадлежит всем отрезкам.

Можно предположить, что при отсутствии каких-либо воздействий внешней среды на принятие решения экспертами, независимо от квалификации экспертов, отрезки-мнения в основном располагались бы симметрично относительно середины наименьшего отрезка с незначительными случайными отклонениями. Явно выраженная односторонняя асимметрия говорит о наличии воздействия. В этом случае метод позволяет при обработке интервальных экспертных мнений «отфильтровать» влияние внешних помех. Рассмотр-

ренный подход может быть реализован следующей процедурой, которую назовем методом последовательных отсечений.

Опишем формально исходные данные для решения поставленной задачи. Обозначим через  $S$  множество сведений об оцениваемом параметре системы, каждому  $i$ -му эксперту соответствует некоторое подмножество  $S_i$  множества  $S$ . Под экспертом будем понимать некоторый оператор  $A$ , определенный на множестве  $S$  и действующий в одноэлементное упорядоченное подмножество декартова квадрата множества действительных чисел  $R^1$ :

$$A : S \rightarrow R^1 \times R^1.$$

Таким образом, мнение  $i$ -го эксперта записывается интервалом  $[a_i, b_i]$ , причем эксперт дает не произвольные действительные числа  $a_i$  и  $b_i$ , а их рациональное приближение. Однако, чтобы не усложнять запись, будем полагать оценку вещественной.

На оператор  $A$  наложим ряд требований.

а.  $A(\emptyset)$  — не существует.

Это требование означает при содержательной интерпретации, что эксперт, ничего не зная об оцениваемом параметре, отказывается от ответа.

б.  $A(S) = X_0$ ,

где  $X_0$  — истинное значение оцениваемого параметра. Эти граничные требования не нуждаются в подробном объяснении.

Более внимательно рассмотрим вопросы, связанные с квалификацией экспертов. Понятно, что квалификация экспертов может быть различна, однако, относительно некоторых экспертов нельзя сказать, кто из них более квалифицирован. Это означает, что множество экспертов частично упорядочено [1]. Поступим следующим образом: объединим неупорядоченных экспертов приблизительно равной квалификации в один класс, тогда вместо множества экспертов  $L$  мы получим некоторое множество, состоящее из непересекающихся классов  $\{L_i\}_{i \in N}$ . Такое разбиение множества определяет некоторое отношение эквивалентности. Множество классов эквивалентности образует так называемое фактор-множество  $L/L_i$ . Тем самым осуществлен канонический эпиморфизм  $g : L \rightarrow L/L_i$  или вложение  $L$  в фактор-множество  $L/L_i$ . На множестве  $L/L_i$  можно ввести отношение порядка, согласованное с квалификацией эксперта. Сформулируем дальнейшие требования.

в. Если  $A_i$  и  $A_j$  — эксперты из одного класса,  $A_i(S') = [a_i, b_i]$ ,  $A_j(S'') = [a_j, b_j]$ ,  $S' \subset S$ ,  $S'' \subset S$ , причем  $S'$  содержит больше информации об оцениваемом параметре, чем  $S''$ , то имеет место условие  $|b_i - a_i| \leq |b_j - a_j|$ .

Данное условие означает, что из двух экспертов одинаковой квалификации более узкий интервал мнений даст эксперт, имеющий больше информации об оцениваемом параметре.

г. Если  $A_i < A_j$ , где  $A_i, A_j$  — эксперты из различных классов  $<$  — отношение порядка,  $A_i(S') = [a_i, b_i]$ ,  $A_j(S') = [a_j, b_j]$ ,  $S' \subset S$  то имеет место условие  $|b_j - a_j| \leq |b_i - a_i|$ .

Данное условие означает: более квалифицированный эксперт при одном и том же количестве информации об оцениваемом параметре дает более узкий интервал мнений.

д. Для любого эксперта  $a \leq X_0 \leq b$ , где  $X_0$  — истинное значение оцениваемого параметра. Это условие означает, что, независимо от внешних воздействий, каждый эксперт должен гарантировать попадание истинного значения оцениваемого параметра в интервал своего мнения.

Рассмотрим процедуру метода последовательных отсечений для обработки результатов экспертного оценивания, базирующуюся на приведенных выше условиях.

Сначала экспертные мнения (отрезки) упорядочиваются по возрастанию длины. Получаем упорядоченную последовательность отрезков:

$$[a_1, b_1], [a_2, b_2], \dots, [a_n, b_n].$$

Если  $a_1 = b_1$ , то задача решена:  $X_0 = a_1 = b_1$ .

Далее определяются координаты так называемого базового отрезка  $[c, d]$ , который является пересечением отрезков-мнений всех экспертов. Пример получения базового отрезка приведен на рис. 1

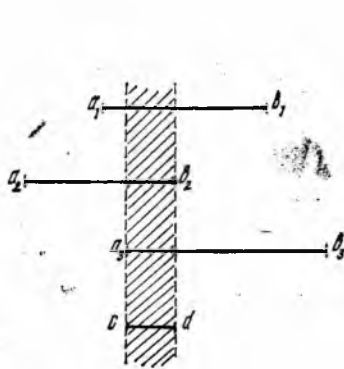


Рис. 1. Построение базового отрезка

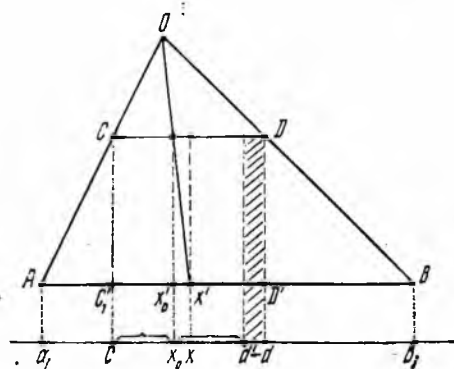


Рис. 2. Уточнение базового отрезка

Согласно условию (д), базовый отрезок содержит истинное значение  $X_0$  анализируемого параметра и является наименьшим из всех отрезков-мнений.

Суть предлагаемого метода заключается в последовательном отсечении справа и слева частей базового отрезка в соответствии с мнением каждого эксперта в порядке возрастания длины соответствующих отрезков-мнений. Середина полученного таким образом базового отрезка и принимается за решение поставленной задачи.

Итак, пусть  $[c, d]$  — координаты текущего базового отрезка;  $[a_i, b_i]$  — координаты текущего анализируемого отрезка, тогда координаты нового базового отрезка  $[c', d']$  пересчитываются по следующему правилу:

$$c' = \max\left(c, \frac{d^2 - c^2 + 2b_i c - a_i d - b_i d}{b_i - a_i}\right);$$

$$d' = \min\left(d, \frac{d^2 - c^2 - 2a_i d + b_i c + a_i c}{b_i - a_i}\right).$$

После выполнения этой операции для всех экспертов получаем результирующий базовый отрезок  $[c_p, d_p]$ . Его середину считаем результатом обработки мнений  $n$ -экспертов

$$x_0 = \frac{c_p + d_p}{2}.$$

Метод последовательных отсечений имеет наглядную геометрическую интерпретацию. Расположим отрезки  $AB$  и  $CD$ , обозначающие соответственно текущий анализируемый отрезок-мнение  $[a_i, b_i]$  и текущий базовый отрезок  $[c, d]$ , параллельно друг другу на произвольном расстоянии (рис. 2). Текущим приближением конечного результата является середина отрезка  $CD$  — точка  $X$ . Необходимо найти новый базовый отрезок  $[c', d']$  и следующее приближение результата  $X_0$ . Соединим концы отрезков прямыми  $AC$  и  $BD$  и продолжим их до получения треугольника  $AOB$ . Соединим прямой точку  $O$  и проекцию  $X'$  точки  $X$  на прямую  $AB$ . Координата  $X_0$  точки пересечения полученной прямой с отрезком  $CD$  и является искомым приближением результата. А новый базовый отрезок  $[c', d']$  получается путем отсеечения от отрезка  $CD$  (в данном случае справа) части таким образом, чтобы точка  $X_0$  стала серединой нового базового отрезка. Здесь наглядно видно, что данный метод как бы отсекает, учитывая мнение эксперта, влияние внешнего воздействия, которое сдвинуло его мнение вправо относительно центра базового отрезка. Нетрудно убедиться, что результат не зависит от расстояния, на котором находятся отрезки  $AB$  и  $CD$ . В первую очередь учитывается мнение экспертов с более узким интервалом мнений, т. е. более квалифицированных или имеющих больше информации об оцениваемом параметре, а мнение менее квалифицированных экспертов уже незначительно меняет базовый отрезок.

Таким образом, метод последовательных отсечений является удобной эвристической реализацией идеи.

Данный метод можно обобщить на случай более сложного оценивания, когда группа экспертов распознает объект, характеризуемый набором из числовых параметров. Тогда мнением  $i$ -го эксперта можно назвать вектор интервалов по каждому параметру:

$$\{[a_i^1, b_i^1], [a_i^2, b_i^2], \dots, [a_i^m, b_i^m]\}.$$

Истинным значением параметров оцениваемого объекта является вектор  $\{X_0^1, X_0^2, \dots, X_0^m\}$ , который находится методом последовательных отсечений, примененным к каждой координате векторов-мнений. Интерес представляет задача, когда эксперт дает не вектор интервалов, а языковую спецификацию объекта или его параметров. Спецификация, являясь более общей, чем объект, как категория, характеризующей целый класс объектов, представима вектором интервалов по каждому из возможных параметров объекта. Если спецификация не затрагивает некоторый параметр, то на соответствующем месте ставится  $\emptyset$ , например:

$$\{[1, 5], [2, 3], \emptyset, [1, 4], \emptyset\} (m=5).$$

Предположим, имеется некоторая система, база знаний которой позволяет автоматически заменять языковую спецификацию вектором интервалов. База знаний системы также содержит информацию о некоторых конкретных объектах в форме векторов-значений их параметров. Процесс распознавания некоторого объекта группой экспертов можно представить следующим образом. Каждый эксперт дает информацию об анализируемом объекте либо в форме вектора-интервалов изменения параметров, либо вектора-спецификаций параметров, либо просто спецификацию объекта, либо комбинацию указанных вариантов. Мнение эксперта из указанной формы система автоматически переводит в вектор интервалов. Далее происходит обработка экспертных мнений последовательно по каждой компоненте вектора в соответствии с приведенным выше методом. В результате получается вектор значений параметров анализируемого объекта. Затем в базе знаний находится вектор значений, наиболее близкий к полученному, а соответствующий ему объект является результатом экспертной идентификации.

Таким образом, метод последовательных отсечений можно применять не только для числовых экспертных оценок, но и для оценок в форме языковых спецификаций. Здесь прослеживается взаимосвязь экспертного оценивания с естественно-языковыми системами, системами распознавания образов, проблемами идентификации.

Метод будет эффективен в диалоговых системах при работе с нечеткими множествами, в частности, при исчислении времени реализации событий в рамках размытых временных интервалов [3].

**Список литературы:** 1. Кузьмин В. Б. Построение групповых решений в пространствах четких и нечетких отношений. М., 1982. 167 с. 2. Алимов Ю. И. Измерение моментов системы случайных величин. Свердловск, 1984. 84 с. 3. Кайкова Е. Б. Система анализа временных естественно-языковых конструкций // Пробл. бионики, 1988. Вып. 41. С. 55—63.

Поступила в редколлегию 09.11.88

**МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ВЕТВЕЙ И ГРАНИЦ ДЛЯ  
АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ**

Язык — это перархическая многоуровневая система лингвистических единиц (букв, леорфов, слов, их сочетаний, предложений и т. д.). Единицы данной системы языка (русского) вступают во взаимодействие (ансамбль) с другими системами (языками) и уровнями систем. Результат этого взаимодействия — проникновение иноязычных слов, появление новых закономерностей в лингвистических описаниях. ,

Лингвистические единицы, вступающие в ансамбль с единицами различных уровней языка, отвечающие законам синтагматики, динамики развития языка, обладающие семантической перспективой, называются потенциально-возможными сочетаниями. Потенциально-возможные сочетания с максимальной частотностью явления в языке образуют ядро языка.

Лингвистические единицы, не вступающие в ансамбль с другими единицами, не отвечающие законам синтагматики и динамики развития языка, не обладающие семантической перспективой, имеющие нулевую частотность в языке, называются потенциально-невозможными сочетаниями. Эта область языка является тупиковой, т. е. не имеющей перспективы сочетаний и развития ядра.

Тупиковые области и области с минимальной частотностью явления в языке образуют периферийные области в языке. Известно, что только 30 % от потенциально-возможных сочетаний лингвистических единиц различных уровней вступают в ансамбль друг с другом, встречаются в естественном языке, поэтому задача выделения ядра языка, прогнозируемых периферийных и тупиковых областей имеет особый практический смысл для многих задач искусственного интеллекта, автоматической обработки информации и речи.

Наиболее эффективный метод общения с высокопроизводительными ЭВМ — непосредственное обращение к внутренним машинным операциям с помощью естественной человеческой речи. В этой связи одной из актуальнейших задач является моделирование лингвистических закономерностей процессов, распознания и синтеза речи. Закономерности синтагматики русской речи являются основополагающими в этих исследованиях: они позволяют прогнозировать следование сочетаний лингвистических единиц в языке. Таким образом, используя результаты исследований синтагматики языка, мы будем двигаться не слепым перебором по комбинаторным ансамблям дискретных лингвистических единиц (КАДЛЕ), а руководствоваться мощным критерием следования — допущениями и ограничениями языка. Естественно, что практические ограничения синтагматики, т. е. запреты на сочетаемость и допущения сочетаемости в естественном языке, существенно сокра-

щают область перебора, объем памяти и время пользования ЭВМ, однако увеличивают вероятность предсказания явления. Существенно ограничат перебор КАДЛЕ и наиболее «информативные», т. е. множество потенциально-возможных сочетаний и их подмножеств, участвующих в процессах естественного языка с максимальной частотностью явления.

Области запретов и допущений сочетаний разделяют введением системы критериев. Предлагается система критериев движения по графу КАДЛЕ. КАДЛЕ — система многокомпонентная, обладающая системой «вращения» в структуре КАДЛЕ и обеспечивающая многоуровневую, многомерную и многокомпонентную связь в КАДЛЕ. Деревья КАДЛЕ построены на основании процесса структурирования (расширения) ядер в КАДЛЕ, а прохождение по ним к цели — на основании критериев следования: критерия движения по вершинам КАДЛЕ в соответствии с некоторой оценочной функцией  $K_d$  критерия комбинаторной мощности КАДЛЕ определенного уровня  $K_m$ ; критерия позиционной активности КАДЛЕ  $K_A$ ; критерия структурного взаимодействия КАДЛЕ различных уровней  $K_{вз}$ .

Критерий оценки должен учитывать перспективность появления новых вершин дерева КАДЛЕ совместно с величиной частотного явления. Эвристические методы достижения цели позволяют КАДЛЕ представить в виде дерева целей.

Критерием оценки наиболее «информативных», т. е. потенциально возможных сочетаний максимальной частотности, является функция  $f$ , значение которой  $f(n)$  для любой вершины  $n$ , представляет собой сумму оценок КАДЛЕ от ядра  $S$  (начальной вершины) сочетаний до целевой вершины  $n$ , т. е. конечного, обладающего семантической множества сочетаний.

Таким образом,  $f(n)$  — критерий оценки перебора по вершинам  $G$  при условии, что этот перебор начинается с ядра  $S$  и проходит через вершину  $n_i$ . По этому предположению движение должно осуществляться в сторону максимальной величины вероятностных частот сочетаний КАДЛЕ.

Иллюстрируя изложенное выше предположение, введем некоторые обозначения. Пусть функция критерия оценки  $R(n_i, n_j)$  дает действительную оценку пути КАДЛЕ между двумя вершинами  $n_i$  и  $n_j$  по максимальной величине вероятностных частот КАДЛЕ. Функция критерия оценки не определена для вершин (сочетаний КАДЛЕ), между которыми нет пути, т. е. множеств КАДЛЕ, которые образуют область тупиковых вершин — запретов естественного языка, частотность которых равна 0.

Если  $T$  — множество целевых вершин, т. е. потенциально-возможных сочетаний КАДЛЕ, обладающих потенциальностью производить удлинение множеств сочетаний и семантической перспективой, то путь перебора от вершины до цели обозначим черз

$$h(n_i) = \max_{n_j \in T} R(n_i, n_j).$$

Путь от вершины ядра КАДЛЕ  $n_i$  к целевой вершине  $n_j$ , для которого достигается  $h(n_i)$ , — оптимальный.

Оценка оптимального пути  $k(S, n)$  от вершины ядра  $S$  КАДЛЕ до некоторой произвольной целевой вершины  $n$ , т. е. до потенциально-возможного сочетания КАДЛЕ максимальной частоты и семантической потенции, определяется при  $q(n) = R(S, n)$  для всех  $n$ , достижимых из ядра  $S$ .

Тогда функция критерия оценки наиболее информативных по величине максимальной частотности явления КАДЛЕ —  $f(n)$  для любой вершины  $n$  равна сумме действительных оценок веса оптимального пути перебора синтагматических закономерностей КАДЛЕ от ядра  $S$  до вершины  $n$  и веса оптимального пути от вершины  $n$  до любой из целевых вершин  $f(n) = q(n) + h(n)$ .

Следовательно, значение  $f(n)$  — вес оптимального пути перебора КАДЛЕ при условии, что он проходит через вершину  $n$ . В случае, когда  $f(S) = h(S)$ , действительный вес пути перебора КАДЛЕ движется от ядра  $S$  к целевой вершине, т. е. к конечному множеству потенциально-возможных сочетаний КАДЛЕ без ограничений.

Критерий оценки движения по дереву перебора КАДЛЕ введем с помощью оценочной функции  $\hat{f}(n) = \hat{q}(n) + \hat{h}(n)$ , где  $\hat{q}$  — оценка для  $q$ ,  $\hat{h}$  — оценка для  $h$ .

В качестве  $\hat{q}(n)$  выбираем вес пути прохождения перебора КАДЛЕ от ядра  $S$  до  $n$  целевой вершины. Это достигается суммированием весов максимальных частот сочетаний КАДЛЕ, лежащих на пути прохождения. Таким образом, передача управления движения синтеза сочетаний КАДЛЕ идет в сторону максимальной величины  $\hat{q}(n_i)$ .

Применение формального аппарата универсальной алгебры конечных предикатов [1] — алгебры отношений единиц естественного языка — позволит формализовать явления максимальной частотности КАДЛЕ, детально и конкретно описать явления более интенсивные по частотности

Метод ветвей и границ [2] хорошо разработан, является классическим для задач искусственного интеллекта. Его новая модификация [3] применена к задачам анализа синтеза и распознавания речи. При решении этих задач учитываются законы синтагматики, парадигматики и динамики комбинаторных ансамблей дискретных лингвистических единиц естественного языка, т. е. потенциально возможных и потенциально невозможных сочетаний графем для письменной речи, сочетаний звуков на фонемном уровне, обладающих потенцией производить или не производить удлинение множеств сочетаний и возможной семантической перспективой.

Начальное состояние исследуемого подмножества сочетаний КАДЛЕ, т. е. так называемую «точку отсчета» рассматриваемого

подмножества сочетаний лингвистических единиц (ЛЕ), примем за начальную вершину графа  $G$ . Граф  $G$  представляет собой множество вершин, описывающих пространство состояний множества сочетаний КАДЛЕ языка и речи. Вершины — потенциально возможные и потенциально невозможные  $K$ -символьные сочетания КАДЛЕ, которые могут обладать потенцией удлинения и семантической перспективой. Пары вершин, связанные между собой законами динамики развития естественного языка, соединяются дугами, направленными от одного члена пары к другому. Таким образом, имеющийся граф  $G$  — направленный граф. Если дуга устремилась от вершины  $n_i$  к вершине  $n_j$ , то вершина  $n_j$  называется дочерней вершиной для  $n_i$ , а вершина  $n_i$  для  $n_j$  — родительской. Ситуация, когда вершины  $n_i$  и  $n_j$  будут «взаимодочерними», описывает множества  $n$ -потенциально возможных сочетаний, обладающих потенцией удлинения сочетаний в обе стороны. В этой ситуации пара направленных дуг называется ребром графа  $G$ . Дуги графа представляют собой специальные операторы, преобразующие пространство состояний множеств сочетаний КАДЛЕ — вершин  $n_i$  в другое состояние, т. е. в  $n_j$ . Множества специальных операторов, обладающих определенными управляющими признаками, которые отвечают поставленной цели, называются специальными операторами цели. Обозначим их через  $\Gamma$ . Далее, при воздействии на пространство структурированного ядра КАДЛЕ, находящегося в начальном состоянии, специальным оператором цели  $\Gamma_i$  строим следующие дочерние вершины графа  $G$ .

Предположим, начальная вершина  $G$  — 2-символьное ядро {ск} 4-х символьных сегментов {скаь, скаа, ская, ...}. Структурирование ядра — приращение количества возможных подмножеств КАДЛЕ, обладающих аналогами в естественном языке и отвечающих законам синтагматики и динамики развития КАДЛЕ в языке. Множества структур сегментов удлиняются, если они имеют максимальную частотность явления. Наиболее интенсивный по частотности явления пучок сегментов образует новое ядро {ски}. Структурированное ядро более мощное по количеству входящих в него подмножеств символов языка, семантической перспективе, интенсивнее по частотности явления.

Подмножества  $\{\{ски\} \vee x e й\}$  представляют собой наиболее интенсивный пучок отношений  $G$ . Разработанный критерий оценки явления  $\hat{q}(n)$ , учитывающий перспективность появления новых вершин дерева КАДЛЕ на основании вероятностных и частотных явлений, условно разделит рассматриваемое множество структур ядра {ск} на подмножества потенциально возможных и потенциально невозможных:

- 1 подмножество  $\{\{ск\} \vee \{а\} \vee \{ь \vee а \vee я\}\}$ ;
- 2       "                $\{\{ск\} \vee \{и\} \vee \{х \vee е \vee й\}\}$ ;
- 3       "                $\{\{ск\} \vee \{о\} \vee \{й\}\}$ .

Величина функции критерия оценки данных подмножеств равна:

$$1 \text{ подмножества } \hat{q}_1(n_i) = 78;$$

$$2 \quad \text{„} \quad \hat{q}_2(n_i) = 405;$$

$$3 \quad \text{„} \quad \hat{q}_3(n_i) = 150.$$

Как видно, именно формализация второго подмножества, частота встречаемости которого максимальна, была бы наиболее правомерна. Формализацию остальных пучков сегментов ядра следует воспринимать как исключение из правил, так как частотность явления минимальна.

Каждый из специальных операторов цели  $G_i$  обладает потенцией раскрытия  $S_i$  вершины, т. е. потенцией изменения состояния исследуемого подмножества сочетаний КАДЛЕ в другое, соответствующее цели. Следовательно, специальный оператор цели — функция, определенная на множестве состояний КАДЛЕ естественного языка или речи, принимающая значения из множества потенциально возможных сочетаний графем и фонем. Множества специальных операторов  $G_i$ , неопределенные на множестве состояний лингвистических единиц естественного языка и речи, образуют тупиковые области в структурах КАДЛЕ. Тупиковые области представляют собой множества потенциально невозможных сочетаний КАДЛЕ письменной и звучащей речи, не обладающих потенцией удлинения сочетаний КАДЛЕ, семантической перспективной и аналогами в естественном языке. Тупиковые области графа  $G$  являются областью тупиковых вершин — запретов КАДЛЕ звучащей и письменной речи, область частотности явлений которых минимальна или равна нулю.

Упорядоченная последовательность состояний множеств сочетаний КАДЛЕ — вершин графа  $n_{i_1}, n_{i_2}, \dots, n_{i_R}$ , в которой каждая вершина  $n_{ij}$  дочерняя для  $n_i, n_{j-1}$  (при  $j=2, \dots, R$ ) обладает потенцией удлинения множества, семантической перспективой, областью максимальной частотности явления, представляет собой структурированное ядро КАДЛЕ. Упорядоченная последовательность состояний множества сочетаний КАДЛЕ — вершин графа  $G$ , т. е. структурированное ядро, является также путем длины  $R$  от вершины  $n_{i_1}$  к вершине  $n_{i_R}$ . Если существует путь от вершины графа  $G$  предыдущего символа сочетаний КАДЛЕ  $n_i$  к вершине  $n_j$  последующего символа сочетаний КАДЛЕ, то, следовательно, вершина  $n_j$  достижима из вершины  $n_i$ . От каждой предыдущей вершины графа  $G$  к последующей идут указатели, позволяющие от цели — конечного символа сочетаний КАДЛЕ, вернуться к начальной вершине и проследить путь решения. Каждая последующая вершина, описывающая пространство состояний множеств сочетаний КАДЛЕ, проверяется на соответствие законам естественного языка, динамике развития процессов синтеза и распознавания речи.



чины  $S_i$ . Вершины  $\{a\}$  и  $\{m\}$  и т. д. являются дочерними для вершины  $\{m\}$ . Воздействуя на вершину  $\{m\}$  специальными операторами  $G_a, G_b, G_c$ , получим потенциально возможные сочетания  $\{m \vee a\} = 1, \{m \vee b\} = 1$  и потенциально невозможные —  $\{m \vee c\} = 0$ , не отвечающие законам синтагматики естественного языка (русского). Следовательно, вершина  $\{b\}$  в данном случае представляет собой тупиковую вершину из области запретов естественного языка. Частотность сочетаний  $\{ш \vee Ы\}$  в письменной и звучащей речи равна нулю. Эта вершина не обладает потенцией удлинений множеств КАДЛЕ и семантической перспективой. В задачах синтеза и распознавания речи она участвовать не будет. Выделение области запретов естественной речи дает экономию при алгоритмизации процессов естественного языка и их обработки на ЭВМ. Множества вершин  $\{a\}, \{ж\}, \{a\}, \{ш\}$  являются «взаимно дочерними», так как обладают потенцией удлинения КАДЛЕ в обе стороны, отвечают законам естественного языка. Направление решения по вершинам графа  $G$  задано указателями. Рассматривая сочетания  $\{ш \vee и\}, \{ш \vee Ы\}$ , фиксируем тупиковую вершину  $\{ы\}$ , не отвечающую законам синтагматики.

Приведенный пример слишком упрощенно рассматривает схему движения по вершинам графа  $G$ , описывающим пространство сочетаний КАДЛЕ. Это лишь попытка проиллюстрировать применение модифицированного метода ветвей и границ для изучения процессов перебора, поиска, анализа, синтеза и распознавания КАДЛЕ естественной речи.

**Список литературы:** 1. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Теория интеллекта. Математические средства. Х., 1984. 144 с. 2. Алгоритм решения задачи о коммивояжере/Дж. Литл, К. Мурти, Д. Суни, К. Кэрел//Экономика и мат. методы. 1965. № 1. С. 93—107. 3. Максимова В. С. Теоретико-графовый метод описания структурированных ядер естественного языка в интерактивных системах//Материалы пятой шк.-семинара «Интерактивные системы». Кутаиси, 2—10 апр. 1983 г. Тбилиси. 1983. С. 315—317.

*Поступила в редколлегию 11.01.89*

УДК 577.352.56

А. В. ЧУРМАСОВ, канд. биол. наук, **М. Ю. УЛЬЯНОВ**, канд. биол. наук,  
Г. А. ХИМИНА

## СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИНАПТИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ

Функциональная специфичность синапса находит отражение, как и в любой системе, в особенностях его структуры [1]. Возможно функция синапса зависит от геометрических параметров (площадь, конфигурация) субсинаптической мембраны (ССМ) [2]. В 70—80 гг. обнаружено 10 различных конфигураций внутрисинаптических нейрофиламентных образований, выполняющих

опорную и трофическую функции [3]. Хотя смысл этих конфигураций не ясен, само выявление их может быть доводом в пользу значимости ССМ. В нашей работе мы развиваем указанные представления с целью выяснить конкретные значения этих геометрических параметров и сопоставить их с данными о нейрофиламентных образованиях.

*Основы моделирования.* Исходным было положение, согласно которому функциональная специфичность синапса определяется механизмом изменения проводимостей ( $\rho_j$ ) каналов, пронизывающих ССМ и предназначенных для проведения ионов  $K^+$  ( $j=1$ ),  $Na^+$  ( $j=2$ ) и  $Cl^-$  ( $j=3$ ). Каждый канал может быть в одном из двух состояний: закрытом ( $\rho_j=0$ ) или открытом ( $\rho_j \neq 0$ ). В период активности синапса открываются все виды каналов. Результирующий ток ( $I$ ), отражающий функцию синапса, зависит от соотношения количеств этих видов каналов на ССМ и интенсивности движения ионов по каждому из них. Причем последняя отличается регулярностью. Тогда, в соответствии с [2], имеем:

$$I = e/h (m_2 b_2 R_2 / d_2 - m_1 b_1 R_1 / d_1 - m_3 b_3 R_3 / d_3);$$

$$rS = \pi/4 (m_1 d_1^2 + m_2 d_2^2 + m_3 d_3^2); \quad (1)$$

$$m_1 = m_3, \quad d_1 = d_3,$$

где  $R_j = kT/e \ln(K_j^b/K_j^a) + (-1)^j V$ ;  $m_j$  — количество различных видов каналов на ССМ;  $d_j$  — диаметры их сечений, равные диаметрам соответствующих ионов;  $b_j$  — подвижности ионов в этих каналах;  $K_j^b$  и  $K_j^a$  — большая и меньшая концентрации ионов по сторонам ССМ;  $S$ ,  $h$ ,  $V$  и  $T$  — площадь ССМ, ее толщина, потенциал и температура в  $^\circ K$ ;  $r$  — суммарная доля площадей сечений каналов от  $S$ ;  $k$  и  $e$  — постоянные Больцмана и заряд электрона,  $\pi = 3,14 \dots$

При определении  $b_j$  будем исходить из понятия подвижности иона:  $b_j = u_j/E$ , где  $u_j$  — скорость перемещения ионов под действием электрического поля напряженностью  $E$ . Если предполагать, что ионы движутся в канале друг за другом без промежутка, то  $u_j = i_j d_j / e$ . Значение тока  $i_j$  в канале вычисляли по закону Ома:  $i_j = V \rho_j$ . В этом же приближении  $E = V/h$ . Следовательно,  $b_j = \rho_j d_j h / e$  (2).

По-видимому, наиболее вероятным является соотношение между каналами, близкое к  $m_1:m_2:m_3=3:1:3$  [2]. Исходя из (1), представим  $I$  как функцию  $S$  и  $m_1$ :

$$I = Z_1 S - Z_2 m_1, \quad (3)$$

где  $Z_1 = 4rR_2\rho_2/(\pi d_2^2)$ ,  $Z_2 = 2d_1^2 R_1 \rho_1 / d_2^2 + R_1 \rho_1 + R_3 \rho_3$ . Понятно, что при некоторых  $S = S^n$  и  $m_1 = m_1^n I = 0$  (условие электронейтральности). Следовательно, если обозначить  $S - S^n = \Delta S$  и  $m_1 - m_1^n = \Delta m_1$ , будем иметь

$$I = Z_1 \Delta S - Z_2 \Delta m_1. \quad (4)$$

Предположим, что каналы распределены по ССМ равномерно (случай плоской ССМ), а относительное их количество определим более общим соотношением  $m_1:m_2 > 1$ . Тогда можно выделить две зоны ССМ. Одна из них связана с центральной частью, где соотношение между каналами приводит к ее электронейтральности, другая — с граничным участком (зоной, пояском) ССМ, в котором данное соотношение не выполняется. Очевидно,  $\Delta S$  и  $\Delta m_1$  являются параметрами граничной зоны. Для их определения можно исходить из представления, что каждая ССМ есть результат суммирования некоторого электронейтрального участка мембраны с ее граничным пояском шириной  $\alpha$ , содержащим избыток  $K^+$ -и  $Cl^-$ -каналов (рис. 1). Для возбуждающего синапса этот пояс вычитается ( $\alpha < 0$ ) из площади электронейтрального участка, для тормозного — прибавляется ( $\alpha > 0$ ) к нему.

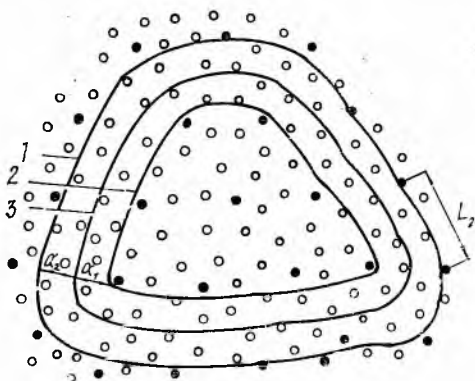


Рис. 1. Схема размещения каналов  $Na^+$ ,  $K^+$  и  $Cl^-$  на мембране:

1 — границы ССМ тормозного синапса; 2 — возбуждающего синапса, 3 — электронейтральный участок мембраны. Выделены граничные зоны возбуждающей (ширина  $\alpha_1$ ) и тормозной (ширина  $\alpha_2$ ) ССМ с преимущественным расположением на ней каналов  $K^+$  и  $Cl^-$ . За исходное принято соотношение, при котором каждый канал  $Na^+$  ( $\cdot$ ) окружают 6 равномерно распределенных каналов  $K^+$  и  $Cl^-$  ( $O$ );  $L_2$  — среднее расстояние между каналами  $Na^+$

Площадь граничного пояса вычисляли умножением его ширины на периметр ( $P$ ) ССМ с учетом поправки на кривизну границы:  $\Delta S = \alpha(P + \alpha\pi)$ .  $\Delta m_1$  можно найти из геометрического соотношения  $r\Delta S = \pi d_1^2 \Delta m_1 / 2$ . Тогда, подставляя  $\Delta S$  и  $\Delta m_1$  в (4), получаем:

$$I = Z_3 \alpha (P + \alpha\pi), \quad (5)$$

где  $z_3 = z_1 = z_2 r / (\pi d_1^2)$ . Таким образом, количество электричества, прошедшего через синапс, находит отражение в длине периметра ССМ и в ширине ее граничной зоны.

Наличие  $S^n$  приводит к изменению концентрации ионов при сохранении потенциала, что может влиять на процесс распространения волны возбуждения по поверхности нейрона [2]. Вероятно каждая ССМ характеризуется определенными  $S^n$  и  $\Delta S$ . Возможно между ними имеется линейная связь вида  $I = f_i(S)$ , различная для возбуждающих ( $i=1$ ) и тормозных ( $i=2$ ) синапсов [2, 4].

Живые системы подчиняются принципу наипростейшей конструкции Рашевского, согласно которому «...та конкретная струк-

тура или конструкция, которую мы действительно находим в природе, является простейшей из возможных структур или конструкций, способных выполнять данную функцию или группу функций» [5]. Проявление действия этого принципа в нашем случае выражается в отождествлении четырех структурных параметров ССМ с соответствующими предельными значениями:

$$S^n \equiv S_{\min}^n, \Delta S \equiv \Delta S_{\min}, P \equiv P_{\min}, N \equiv N_{\min}, \quad (6)$$

где  $N$  — показатель сложности конфигурации ССМ, отражающий количество складок ее границы относительно окружности с той же площадью. Применение указанного принципа обосновывает предположение о равномерном распределении каналов по мембране и исключает допущения о фрагментарности действия различных участков  $S^n$  и  $\Delta S$ , приводящие к неоднозначности их параметров.

Принимая во внимание вид связи  $P$  с  $S$ , определим  $\alpha = \alpha_{\max}$ , если только  $C = P/S^{1/2} \geq 2\pi^{1/2}$ . При  $C = 2\pi^{1/2}P$  не всегда может быть длиной окружности, если  $\alpha = \alpha^{\max}$ , тогда  $\alpha = \Delta S/(CS^{1/2})$  для наиболее интересного случая  $P \gg \alpha$ .

При определении конфигурации ССМ каждую складку границы представляли в виде колоколообразной кривой, включающей в общем случае систему более мелких непересекающихся складок. Возможные их размеры — ширина и высота, превышали расстояния между каналами. При этом учитывали явные ограничения суммарной площади складок, что позволило конкретизировать  $\alpha_{\max} \cong L_2/2$  (см. рис. 1).

В соответствии с (6) ССМ тяготеют к круглым формам. Если же простейшими фигурами, удовлетворяющими соотношениям между  $S^n$  и  $\Delta S$ , являются одно-, двух- (эллипсовидные) или трех- (треугольникообразные) складчатые, то именно они и приобретают поочередно преимущества среди множества более сложных конфигураций. Большого числа складок не возникает, так как с учетом вариаций параметров указанных форм интервал допустимых изменений  $C$  отдельных фигур определен. Возможность дальнейшего увеличения  $C$  обеспечивает объединение различных ССМ в комплексы. Таким образом, уменьшается вырожденность  $C$ .

Так как в модели существенны геометрические параметры ССМ, естественно предположить, что остальные элементы синапса адаптированы к ним. Выполнению опорной и трофической функций нейрофиламентным образованием, представленным в виде жгута из микротрубочек белковой природы, способствует расположение его в плоскости, приблизительно параллельной ССМ [6]. Поэтому данное предположение можно выразить следующим образом:

$$P/P_\phi = \eta, S/S_\phi = \eta^{1/2}, N/N_\phi = 1, \quad (7)$$

где  $P_\phi$ ,  $S_\phi$  и  $N_\phi$  — соответственно, длина нейрофиламентного контура, ограниченная им площадь и параметр конфигурации;  $\eta$  — коэффициент пропорциональности, по-видимому, близкий к 1 [6].

*Следствия модели и их обсуждения.* 1. Оценим величину  $b_j$  (2). Экспериментальные значения  $\rho_j$  для  $\text{Na}^+$ - и  $\text{K}^+$ -каналов характеризуются одинаковым интервалом  $(4 \div 60) \cdot 10^{-12}$  см [7].  $d_1 = d_3 = 8 \cdot 10^{-10}$  м,  $d_2 = 7,4 \cdot 10^{-10}$  м [2]. Подставляя  $\rho = 30 \cdot 10^{-12}$  см,  $d = 7,8 \cdot 10^{-10}$  м и  $h = 100 \cdot 10^{-10}$  м в (2), получим искомое  $b = 13,8 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/в·с. Отношение подвижностей ионов в мембране и в растворе ( $b_p$ ), по-видимому, близко к  $10^{-2}$  [2]. Если учесть, что среднее значение  $b_p = 6 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/м·с, то действительно получаем отношение того же порядка  $2,3 \cdot 10^{-2}$ . Учитывая, что  $b_j R_j / h$  имеет смысл скорости движения зарядов в мембране, легко вычислить количество ( $u_j$ ) выходящих ионов  $\text{K}^+$  и  $\text{Na}^+$  из канала в единицу времени  $\bar{u}_j = \rho R_j / e$ :  $u_1 = 4,7 \cdot 10^6$  ион/с,  $u_2 = 1,7 \cdot 10^7$  ион/с, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными:  $\bar{u}_1 = 3 \cdot 10^6$  ион/с,  $\bar{u}_2 = 10^7 \div 10^8$  ион/с [7]. При этом брали общепринятые концентрации ионов для нервной клетки, ммоль:  $K_1^{\delta} = 150$ ,  $K_1^{\mu} = 5,5$ ,  $K_2^{\delta} = 150$ ,  $K_2^{\mu} = 15$ ;  $V = 60$  мВ;  $T = 27^\circ\text{C}$ . Измеренное значение тока в  $\text{Na}^+$  канале составляет единицы  $\times 10^{-12}$  А. Это также соответствует вычисляемому  $i_2 = \bar{u}_2 e = 2 \cdot 10^{-12}$  А. Таким образом, есть основания считать, что исходные посылки для определения  $b_j$  были правильными.

2. При нахождении тока (5) необходимо знать плотность размещения каналов на ССМ. По многим данным плотность каналов  $\text{Na}^+$  ( $\Pi_2$ ) на поверхности сомы и аксона нервной клетки составляет  $20 \div 600$  каналов на  $\text{мк}^2$  [2, 7]. На перехватах Ранвье число каналов достигает несколько тысяч на  $\text{мк}^2$ . Плотность  $\text{K}^+$ -каналов ( $\Pi_1$ ) возможно еще большая. Суммарная плотность каналов может быть  $\sim 10^4$  мк. Правомерно предположение, что с учетом плотности  $\text{Cl}^-$ -каналов ( $\Pi_3$ )  $g = (\Pi_1 + \Pi_3) / \Pi_2 = 6$  [2].

По определению  $r = \pi d_1^2 \Pi_2 (g + 1) / 4$ . Кроме того,  $r \approx d_1^2 / L^2$ , где  $L$  — среднее расстояние между каналами. Тогда  $\alpha = (\pi \Pi_2)^{-1/2}$ . Раскрывая (5) и учитывая, что обычно  $P \gg \alpha$  для возбуждающих (—) и тормозных (+) синапсов, получим

$$I = \pm \frac{\rho \Pi_2^{1/2} (g + 1)}{2\pi^{1/2}} \left( \frac{kT}{e} \ln \frac{K_1^{\delta} K_3^{\delta}}{K_1^{\mu} K_3^{\mu}} - 2|V| \right). \quad (8)$$

В качестве примера возьмем  $P = 10$  мк. Эта величина соответствует с учетом гексагонального расположения каналов, эллипсу с осями  $0,7 \times 1,3$  мк. Такие размеры синаптической бляшки широко распространены [1]. Пусть  $\Pi_2 = 500$  мк<sup>-2</sup>. Концентрации ионов  $\text{Cl}^-$  известны:  $K_3^{\delta} = 125$ ,  $K_3^{\mu} = 9$  ммоль. Подставляя эти параметры в (8), найдем  $I = 4,5 \cdot 10^{-10}$  А. Если принять  $L = 80 \cdot 10^{-10}$  м  $\times (\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 = 1,7 \cdot 10^4 \text{ мк}^{-2})$ , что возможно является более представительным [2], то  $I = 10^{-9}$  А.

Последнее значение тока лучше соответствует экспериментальным данным, лежащим в интервале  $10^{-9} - 10^{-8}$  А [4]. Несколько

заниженную вычисленную величину тока можно связать с принятыми приближениями модели и выбранными экспериментальными значениями параметров синапса. Например, представление ССМ в виде плоской поверхности и одновременное «включение» каналов не всегда оправдано. По данным электронной микроско-

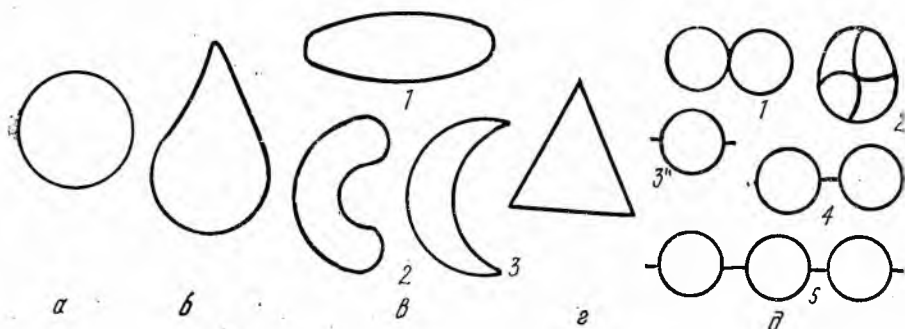


Рис. 2. Сопоставление прогнозируемых форм нейрофиламентных структур пресинапса с экспериментально выявленными [3]:

*а* — круглая; *б* — односкладчатая, грушевидная; *в* — эллипсовидные (1 — овальная; 2 — многокамерная, 3 — серповидная); *г* — треугольникообразная; *д* — объединенные (1 — восьмерковидная, 2 — многокамерная, 3 — транснейрональная, 4 — двух- и трехзвеньевая цепочечная). ' — схематическое изображение комплексов, различающихся формой, величиной, количеством и видом объединения исходных ячеек-камер; " — по-видимому, является звеном цепочечных

пии ССМ часто имеют складки [4], количество которых возрастает при функциональной нагрузке [1]. Различное время диффузии медиатора к поверхности складок и изменение его концентрации дает основание считать данные изгибы функционально аналогичными граничной зоне. Поэтому *P* в этом случае также следует увеличить.

3. Контуры ССМ, по-видимому, не меняются при функциональной нагрузке [1]. Это справедливо, вероятно, и в отношении нейрофиламентных образований, так как наблюдаемые колебания объемов пресинапсов связаны с перераспределением ионов и воды между нейроном и межклеточным пространством. Структурная стабильность этих органоидов соответствует предполагаемой корреляции (7) и дает основание сопоставить регистрируемые конфигурации нейрофиламентных образований с прогнозируемыми (рис. 2). Из данного сопоставления следует, что модель хорошо отражает фактические материалы.

Соответствие полученных следствий модели экспериментальным результатам свидетельствует в пользу адекватности развиваемых представлений. При существовании зависимости  $I=f_i(S)$  возникает возможность дифференцировать возбуждающие и тормозные синапсы по формам их нейрофиламентных образований.

**Список литературы:** 1. Сотников О. С. Динамика структуры живого нейрона. Л., 1985. 160 с. 2. Антомонов Ю. Г., Котова А. Б. Введение в структурно-функциональную теорию нервной клетки. К., 1976. 264 с. 3. Ульянов М. Ю., Бирюкова М. А., Плишкина К. И., Хилина Г. А./Арх. анатомии, гистологии и эмбриологии, 1975. 128. № 3. С. 22; 4. Шаповалов А. И. Клеточные механизмы синаптической передачи. М., 1966. 318 с. 5. Антомонов Ю. Г. Принципы нейродинамики. К., 1974. 200 с. 6. Грей Э. Электронно-микроскопическая анатомия. М., 1967. С. 196. 7. Армстронг К. Мембраны: ионные каналы. М., 1981, с. 98.

Поступила в редколлегию 11.09.89

УДК 57.02.001.57

П. В. ВАСИЛИК, канд. биол. наук, О. А. КРИВОВА

### ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ САМОРЕГУЛЯЦИИ ПРОТОБИОНТОВ

В зарубежной литературе все больше публикаций посвящается вопросам неравномерности развития в истории органического мира. В качестве источников такой неравномерности выдвигаются различные причины, в том числе космические [1]. В частности, в истории развития растительного мира имели место периоды усиленного роста растительной массы, что приводило к накоплению залежей углерода органического происхождения. Единственная до сих пор приемлемая гипотеза называет в качестве причины этого явления изменение светового режима растений, обусловленного изменением облачного покрова планеты. Однако лабораторные эксперименты с изменением светового режима растений не дают результатов, сравнимых с теми, которые имели место в прошлом при «флористических революциях», и сопровождавших их накопления растительных масс [2]. По-видимому, для растений наиболее важна электромагнитная энергия светового и околосветового диапазона. Для объяснения ускоренного роста и развития растений приходится допустить, что стимулирующая электромагнитная энергия была особым образом организована: в форме когерентных колебаний [3]. Такое допущение связано с тем, что в эксперименте показано стимулирующее влияние когерентного излучения на ход химических реакций (фотохимическое действие лазерного излучения), а в последние годы получены экспериментальные данные о стимулирующем влиянии когерентного излучения на живой организм [4].

Откуда могло поступать когерентное излучение, тем более, что до поверхности Земли могло доходить только излучение, соответствующее окнам прозрачности атмосферы для электромагнитных волн? Так как в некоторых «окнах прозрачности» все же наблюдается значительное поглощение, то излучение должно быть достаточно мощным. В нашей планетной системе структура и жизнь биосферы поддерживается энергией Солнца и других сравнимых источников энергии нет. Поэтому естественно предположить, что поток энергии Солнца в отдельные периоды развития органическо-

го мира модулировался каким-то механизмом. В поисках такого механизма наше внимание привлекают сведения о молекулярных облаках газов, имеющих в нашей Галактике, особенно вдоль ее спиральных рукавов [5]. При движении Солнца вокруг центра Галактики могла возникнуть ситуация, когда наше светило двигалось в облаке молекулярного газа. Согласно одной из моделей возникновения космических мазеров в молекулах набегающих на звезду газов возникают условия для генерации когерентных электромагнитных колебаний [5]. В зависимости от состава молекулярного облака возможна генерация когерентных электромагнитных колебаний с различными длинами волн. Например, если облако состоит из молекул CO, возможно излучение на частоте  $1,15 \cdot 10^{11}$  гц. Радиоастрономическими исследованиями установлено, что от отдаленных звезд к нам поступает очень слабое когерентное электромагнитное излучение на различных частотах, в том числе на частоте  $10^9, 10^{10}$  гц [5].

Таким образом, периодическую стимуляцию роста растений можно объяснить с помощью когерентного излучения, возникающего за счет энергии Солнца в облаке набегающего газа. Периоды усиленного роста растений являются переходными процессами в биосфере. В ряду таких переходных процессов, связанных с когерентным электромагнитным излучением, по-видимому, находится и процесс возникновения биосферы.

Процесс возникновения биосферы начался с образования протобионтов. В работе [6] показано, что в прибрежной зоне на поверхности первичных морей могли возникнуть характерные структуры, микросферы, окруженные биослойной мембраной, обладающие рядом свойств протобионтов, однако, без механизма саморегуляции. Задача состоит в том, чтобы построить правдоподобную модель возникновения механизмов саморегуляции в подобных образованиях, т. е. поддержание определенного молекулярного состава и, соответственно, частотного диапазона управления потоками энергии и вещества через мембрану протобионтов, обеспечение характерных свойств живого — возбудимости, делимости. Современной науке известны динамические образования в сплошных средах, обладающие рядом подобных свойств, в частности: деление на несколько дочерних исходной формы, слияние двух образований в одно с сохранением исходных характеристик, восстановление динамической структуры в ответ на воздействие внешней среды. Такие образования получили название «уединенные волновые пакеты», или «солитоны» [7]. Известно, что солитоны возникают при различных типах физических воздействий, в частности, под воздействием когерентных электромагнитных колебаний [7].

Можно полагать, что под влиянием когерентного электромагнитного излучения на частоте, близкой к частоте внешнего излучения, в микросфере возникли условия для поддержания этих колебаний, а также условия для возникновения многочастотных связанных колебаний по типу «стоячего солитона» (причем частота когерентного колебания входит в систему взаимосвязанных коле-

баний солитона). С этой точки зрения представляет интерес модель трансформации энергии мембраны, предложенная Фрелихом, в которой предполагается наличие когерентных электрических колебаний в мембране в диапазоне частот  $10^{11}$ — $10^{12}$  гц [8].

Нам представляется, что механизм существования когерентных колебаний в мембране необходимо дополнить представлением о том, что когерентные колебания являются всего лишь одной из мод многочастотного волнового процесса, возникающего в мембране протобионта, который можно сравнить с солитоном («стоячий ленгмюровский солитон», «бризер»). Система солитон — когерентные колебания образует замкнутый контур регуляции по поддержанию динамической структуры в мембране протобионта. Ни сам по себе солитон, ни само по себе когерентное колебание в мембране не могут сохранять свою структуру достаточно долго, только своего рода коллективный эффект взаимодействия этих двух процессов способствует возникновению единой саморегулирующей динамической структуры, способной существовать продолжительное время. Причем функции отдельных элементов этой структуры различны. Так, солитон способствует вовлечению различных образований во взаимосвязанный колебательный процесс, перекачке энергии от одних структур к другим, и тем самым обеспечивает поддержание механизма генерации когерентных колебаний. С другой стороны, когерентные колебания, реализованные на части молекулярных структур протобионта, являются необходимым условием продления жизни солитона. Таким образом, солитон представляется организатором ансамбля электромагнитных и химических колебательных процессов, так что с его помощью реализуется перекачка энергии из одного диапазона в другой, в том числе для поддержания внутренних когерентных колебаний. Солитон может существовать и без когерентных колебаний, однако, весьма непродолжительное время. С другой стороны, взаимодействие когерентных колебаний со средой приводит к возникновению солитона, а в нашем случае, когда когерентные колебания являются составной частью солитона, они приводят к восстановлению структуры солитона, которая непрерывно нарушается тепловыми и другими флуктуациями. Итак, когерентные колебания в составе солитона являются орудием его самовосстановления и, тем самым, сохранения его существования. Принципиальным отличием нашей схемы от модели Фрелиха являются два момента: возникновение когерентных колебаний возможно только за счет прямой накачки когерентными колебаниями извне; предполагается механизм саморегуляции, состоящий из двух взаимосвязанных динамических структур — солитона и когерентных колебаний.

Процессы в живом организме с позиции теории солитона уже описаны. В частности, широко известны модели Давыдова, где ряд биологических процессов, связанных с переносом и трансформацией энергии, рассматривается на основе представления о солитонах («давыдовские солитоны») [9]. С другой стороны, известна упоминавшаяся нами модель Фрелиха ряда феноменов упорядо-

чения колебаний в биологических объектах. Предпринята попытка объединить в математическом описании эти две модели биологического порядка с помощью уравнения Шредингера особого вида:

$$i\dot{C}_l = W_l C_l + \sum_{k, k'} Y_{kk'} C_{k+k'+l}^+ C_k C_{k'},$$

где  $Y_{kk'} = \Delta_{k, k', l-k'} + \Delta_{k, k', k-l}$ .

Причем некоторые решения этого уравнения могут быть классифицированы как: статические (не зависящие от времени) — эта группа решений изучалась Фрелихом; динамические — были исследованы Давыдовым. Таким образом, в зависимости от накладываемых конкретных физических ограничений на систему вибрирующих диполей, как показано в работе [10], можно получить движущийся солитон или модель когерентных колебаний мембраны. Авторы отмечают, что распространение солитона в биологических молекулах должно сопровождаться феноменом упорядочения колебательных состояний таким образом, что становится возможным возникновение когерентных колебаний, а с другой стороны, структуры, на которых возникают когерентные колебания, способствуют распространению солитонов. В предлагаемой схеме рассматривается так называемый «стоячий солитон», который также создает условия для возникновения когерентных колебаний. Отличаются и условия возникновения когерентных колебаний; в нашем случае для их поддержания достаточно энергии, поставляемой солитоном, а для возникновения когерентных колебаний необходима накачка энергии внешними когерентными электромагнитными колебаниями. Возникнув, такая система солитон — когерентные колебания может преобразовывать поступающую извне энергию так, что уже отпадает необходимость в накачке с помощью внешних когерентных колебаний, т. е. возникает самостоятельный контур преобразования и организации энергии.

Рассмотренная система саморегуляции, возникающая в мембранах микросфер под влиянием внешнего когерентного электромагнитного излучения, преобразовывает существование микросфер, наделяя их рядом характерных особенностей живого и, тем самым, преобразует их в протобионты. Такие протобионты уже будут обладать рядом характерных свойств: элементарным обменом веществ, который приходит на смену поступлению энергии за счет внешних когерентных колебаний, способностью к делению, элементами раздражимости и адаптации. Так как происхождение солнечной системы через молекулярное облако газа могло продолжаться достаточно долго (порядка десятков и сотен лет), то различные протобионтные образования могли путем деления быстро заселить все первичные моря планеты. Захват ими водной поверхности нашей планеты и означал возникновение биосферы. Сочетание молекул и ионов в каждом отдельном участке моря способствовало возникновению протобионтов со своими параметрами, с различной индивидуальностью, характеризующейся различным

набором молекул и, соответственно, частот колебаний. Таким образом, одновременно появился сложный комплекс форм, который потом развился в современную живую природу, что соответствует представлениям Вернадского о возникновении биосферы.

Возникший в микросферах под влиянием когерентного излучения механизм саморегуляции солитон—когерентные колебания содержал в себе в свернутой форме все богатство развернувшихся затем в биосфере многообразных механизмов регуляции живого. Этот механизм обладал потенциальными возможностями для развития процессов саморегуляции, благодаря чему и стала возможной эволюция биосферы.

**Список литературы:** 1. *Катастрофы* и история Земли/Под ред. У. Бергрена. М., 1986. 471 с. 2. *Давиташвили Л. Ш.* Причины вымирания организмов. М., 1969. 440 с. 3. *Василик П. В.* Об одной модели симбиоза клеток//Кибернетика и вычислит. техника. 1979. Вып. 49. С. 18—26. 4. *Биологическое действие лазерного излучения*//Межвузовский сб. Куйб. гос. ун-та. 1984. 149 с. 5. *Инфракрасная астрономия*/Под ред. Ч. Уинн-Уильямса. М., 1983. 448 с. 6. *Фокс С. У., Дозе К.* Молекулярная эволюция и возникновение жизни. М., 1975. 374 с. 7. *Цытович В. Н.* Нелинейные эффекты в плазме. М., 1967. 287 с. 8. *Frölich H.* Coherence in biology//Coherent excitation in biological system. Berlin, 1983. P. 1—5. 9. *Давыдов А. С.* Солитоны в биоэнергетике. К., 1986. 159 с. 10. *Tuszynski I. A., Paul R., Chatterjee R. P.* Relationship between Frölich and Davydov model of biological order//Phys. Rev. A. 1984. 30, № 5. P. 2666—2675.

Поступила в редколлегию 16.12.88

УДК 631.513

С. А. КРИВОШЛЫК, И. П. ПЛИСС, канд. техн. наук

### АДАПТИВНАЯ МОДЕЛЬ-ФИЛЬТР КОРОТКОЛАТЕНТНЫХ ВЫЗВАННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ МОЗГА

Эффективным средством диагностики заболеваний центральной нервной системы является анализ вызванной биоэлектрической активности мозга в ответ на сенсорный раздражитель. Особое внимание привлекли коротколатентные вызванные потенциалы (КВП), которые формируются в стволе мозга. КВП представляют собой реализации нестационарного случайного процесса длительностью приблизительно 10 мс с амплитудой до 1 мкВ и спектром, лежащим в полосе 100—1500 Гц [1, 2]. Основная трудность анализа КВП состоит в выделении полезного сигнала из шумов биологического и технического происхождения. Стандартная методика выделения основана на когерентном накоплении постстимульных реализаций электроэнцефалограмм (ЭЭГ) и их фильтрации в заданной полосе. При этом для надежного выделения сигнала необходимо иметь от 1000 до 3000 реализаций ЭЭГ, что требует значительных объемов памяти используемой аппаратуры.

Анализ современного состояния вопроса выдвигает ряд задач [1—3].

*Выбор оптимальной процедуры фильтрации сигналов.* Для этой цели предлагается использовать нерекурсивный цифровой фильтр с фиксированными параметрами [1], однако, обоснованный выбор полосы пропускания фильтра остается нерешенной задачей. Отмечается [2] целесообразность применения адаптивной фильтрации, но никакие конкретные рекомендации не дается.

*Идентификация параметров КВП.* Представление больших объемов информации (до 3000 реализаций ЭЭГ у одного пациента) в форме компактной математической модели является удобным средством анализа и хранения. Здесь возникает задача выбора структуры модели (в [3] подчеркивается целесообразность представления биомедицинской информации в форме авторегрессионных моделей достаточно высокого порядка) и алгоритма идентификации, удовлетворяющего противоречивым требованиям быстродействия, помехоустойчивости и простоты численной реализации. Эти требования обуславливаются характером идентифицируемых процессов и характеристиками современной электронной медицинской аппаратуры (ограниченная разрядность слова, низкое быстродействие, малый объем памяти).

*Определение оптимального количества накапливаемых реализаций ЭЭГ.* Решение данной задачи позволит сократить время проведения обследования пациента, что особенно важно при проведении массовой диспансеризации населения, и сэкономить память аппаратуры.

Сформулированные задачи приводят к выводу о том, что наиболее эффективным аппаратом их решения могут служить методы адаптивной фильтрации и идентификации, связанные, прежде всего, с высоким уровнем априорной неопределенности о характеристиках исследуемых процессов, их нестационарностью, стремлением ослабить требования к достоверности, точности и объему информации.

Методы адаптивной фильтрации и адаптивной идентификации достаточно хорошо разработаны, однако непосредственное их применение в задачах обработки КВП осложняется тем, что необходимо параллельно решать задачи фильтрации по ансамблю реализаций и идентификации отфильтрованной информации во времени, т. е. возникает задача пространственно-временной фильтрации-идентификации. Поясним сказанное на примере.

Информация о каждом пациенте представляется набором числовых данных  $x(i, t)$ , где  $i = \overline{1, M}$  — номер отдельной реализации ЭЭГ,  $t = \overline{1, T}$  — номер дискретного отсчета в  $i$ -й реализации. Общее число наблюдений, равное  $MT$ , может быть достаточно велико и потребовать больших объемов памяти. Пространственную обработку информации по ансамблю с целью выделения полезного сигнала из шумовой составляющей производим с помощью нерекурсивного цифрового фильтра

$$y(i, t) = \sum_{j=0}^k a_j x(i-j, t) \quad \forall t = \overline{1, T},$$

при этом  $i$  может изменяться от  $k+1$  до  $M$ . Отфильтровав  $T$  раз ансамбль из  $M$  реализаций, получаем сглаженный процесс

$$y_*(M, t) = \sum_{j=0}^k a_j x(M-j, t),$$

в соответствие которому может быть поставлена авторегрессионная модель

$$\hat{y}(M, t) = \sum_{l=1}^m b_l y(M, t-l) + w(t),$$

где  $t \in \overline{m+1, T}$ ,  $w(t)$  — шум наблюдений, характеристики которого в общем случае неизвестны.

Организация обработки данных в реальном времени требует введения настраиваемого фильтра

$$y(i, t) = \sum_{j=0}^k \hat{a}_j x(i-j, t), \quad i = \overline{k+1, M} \quad (1)$$

и настраиваемой модели

$$z(i, t) = \sum_{l=1}^m \hat{b}_l y(i, t-l), \quad t = \overline{m+1, T}, \quad (2)$$

где текущие оценки  $\hat{a}_j$  и  $\hat{b}_l$  уточняются с помощью некоторой адаптивной процедуры, однако при этом необходимо, чтобы одновременно работало  $T$  фильтров, что неприемлемо в силу вычислительных трудностей.

Объединив (1) и (2):

$$z(i, t) = \sum_{l=1}^m \hat{b}_l \sum_{j=0}^k \hat{a}_j x(i-j, t-l) = \sum_{l=1}^m \sum_{j=0}^k \hat{b}_l \hat{a}_j x(i-j, t-l), \quad (3)$$

после строчной векторизации информации в реальном времени  $\tau = 1, 2, \dots, T, T+1, \dots, 2T, \dots, (i-1)T+t, \dots, MT$  (при этом  $x(i, t) = x(\tau) = x((i-1)T+t)$ ) и ввода в рассмотрение  $(k+1)m \times 1$  вектора фазовых переменных  $\varphi(\tau) = (x(i, t-1), \dots, x(i-k, t-1), x(i, t-2), \dots, x(i-k, t-2), \dots, x(i, t-m), \dots, x(i-k, t-m))^T$  запишем адаптивную модель-фильтр КВП

$$\hat{z}(\tau) = \hat{\theta}^T(\tau-1) \varphi(\tau), \quad (4)$$

где  $\hat{\theta}(\tau-1) = (k+1)m \times 1$  — вектор настраиваемых параметров.

Модель-фильтр (4) содержит на  $k(m-1)-1$  неизвестных параметров больше, чем соотношения (1) и (2), однако здесь объединены процедуры фильтрации и идентификации, что значительно упрощает машинную реализацию и сокращает потребный объем памяти.

Настройка параметров модели-фильтра производится с помощью адаптивной рекуррентной процедуры вида

$$\hat{\theta}(\tau) = \hat{\theta}(\tau-1) + P(\tau) (x(\tau) - \hat{\theta}^T(\tau-1) \varphi(\tau)) \varphi(\tau), \quad (5)$$

где  $P(\tau)$  — коэффициент усиления алгоритма, определяющий его структуру, следящие и фильтрующие свойства. Так, матричный коэффициент  $P(\tau)$ , обеспечивающий наилучшие фильтрующие свойства, приводит к рекуррентному методу наименьших квадратов:

$$\hat{\theta}(\tau) = \hat{\theta}(\tau - 1) + P(\tau) (x(\tau) - \hat{\theta}^T(\tau - 1) \varphi(\tau)) \varphi(\tau),$$

$$P(\tau) = P(\tau - 1) - \frac{P(\tau - 1) \varphi(\tau) \varphi^T(\tau) P(\tau - 1)}{1 + \varphi^T(\tau) P(\tau - 1) \varphi(\tau)},$$

а скалярный коэффициент усиления — к алгоритму Гудвина—Рэмеджа—Кэйнеса [7]:

$$\hat{\theta}(\tau) = \hat{\theta}(\tau - 1) + ar^{-1}(\tau) (x(\tau) - \hat{\theta}^T(\tau - 1) \varphi(\tau)) \varphi(\tau),$$

$$r(\tau) = r(\tau - 1) + \|\varphi(\tau)\|^2, \quad r(0) = 1, \quad 0 < a < 2, \quad P(\tau) = ar^{-1}(\tau).$$

Обладая наилучшими фильтрующими свойствами, эти алгоритмы непригодны для идентификации параметров нестационарных процессов.

Придание алгоритмам следящих свойств связано с введением дисконтирования устаревшей информации. Однако при этом широко распространенный экспоненциально взвешенный метод наименьших квадратов характеризуется численной неустойчивостью (особенно при микропроцессорной реализации), довольно быстро вырождается и приводит к взрыву параметров ковариационной матрицы.

В связи с этим для анализа КВП предлагается применять устойчивые алгоритмы с экспоненциальным дисконтированием информации:

градиентный оптимальный по быстродействию модифицированный алгоритм одновременного действия [8]:

$$\hat{\theta}(\tau) = \hat{\theta}(\tau - 1) + \frac{\bar{v}^2(\tau) (p(\tau) - R(\tau) \hat{\theta}(\tau - 1))}{\|p(\tau) - R(\tau) \hat{\theta}(\tau - 1)\|^2};$$

$$\bar{v}^2(\tau) = (x(\tau) - \hat{\theta}^T(\tau - 1) \varphi(\tau))^2 + \alpha \bar{v}^2(\tau - 1);$$

$$p(\tau) = x(\tau) \varphi(\tau) + \alpha p(\tau - 1); \quad R(\tau) = \varphi(\tau) \varphi^T(\tau) + \alpha R(\tau - 1), \quad 0 < \alpha \leq 1$$

и модифицированный алгоритм Гудвина—Рэмеджа—Кэйнеса [9]:

$$\hat{\theta}(\tau) = \hat{\theta}(\tau - 1) + ar^{-1}(\tau) (x(\tau) - \hat{\theta}^T(\tau - 1) \varphi(\tau)) \varphi(\tau);$$

$$r(\tau) = ar(\tau - 1) + \|\varphi(\tau)\|^2, \quad 0 < a \leq 1.$$

При этом уменьшение параметра дисконтирования  $\alpha$  приводит к улучшению следящих свойств алгоритма (в пределе при  $\alpha=0$  приходим к алгоритму Качмажа), а его увеличение — к улучшению фильтрующих свойств.

Обработка информации продолжается до выполнения условий останова алгоритмов, обычно

$$\frac{1}{D} \sum_{\alpha=1}^D \|\hat{\theta}(\tau + d) - \hat{\theta}(\tau + d - 1)\| \leq \epsilon,$$

где  $D$  — интервал сглаживания оценок,  $\epsilon$  — достаточно малое положительное число.

Использование предлагаемого подхода к обработке КВП обладает рядом преимуществ по сравнению с известными:

— фильтрация и идентификация происходят одновременно с помощью адаптивной модели-фильтра, полоса пропускания которой и настройка параметров происходят в реальном времени по мере поступления информации;

— нет необходимости накопления больших объемов информации: в оперативной памяти хранятся только  $(k+1)$  последние реализации ЭЭГ;

— сокращение времени обследования, которое прекращается при достижении сходимости параметров модели-фильтра;

— удобная форма представления информации в виде  $(k+1)m$  параметра;

— удобство сравнения характеристик в динамике;

— снижение требований к характеристикам аппаратуры для обработки информации.

**Список литературы:** 1. *Создать и ввести в эксплуатацию систему автоматизации лечебно-диагностического процесса в основных подразделениях поликлиники для обслуживания района с населением 50 тыс. человек: Отчет о НИР (заключительный)/ВНИИМП; Руководитель В. П. Гундаров. 0.18.05.040 6. 30—179 НИР № ГР 81050309; Инв. № 02860045503. М., 1985. 224 с. 2. Киреев А. М. Использование методов автоматизированной обработки коротколатентных вызванных потенциалов мозга в диагностике заболеваний центральной нервной системы//Мед. техника для всеобщей диспансеризации населения. Науч. труды М., ВНИИМП. 1985. С. 15—18. 3. Isaksson A., Wennberg A., Letterberg L. H. Computer Analysis of EEG Signals with Parametric Models//Proc. IEE. 1981. 69. № 4. P. 55—68. 4. Мизин И. А., Мареев А. А. Цифровые фильтры, М., 1979. 240 с. 5. Шильман С. В. Методы адаптивной фильтрации случайных процессов//Динамика систем: Адаптация и оптимизация. 1985. С. 22—51. 6. Macchi O. Advances in adaptive filtering//Dig. Commun. Proc. 2-nd Int. Workshop. 1986. P. 41—57. 7. Goodwin G. C., Ramadge P. J., Caines P. E. A globally convergent adaptive predictor//Automatica. 1981. 17. № 1. P. 135—140. 8. Об одном многошаговом адаптивном алгоритме идентификации нестационарных объектов/Е. В. Бодянский, И. П. Плисс, Х., 1983. 8 с. Деп. в УкрНИИТИ 06.01.84. № 183 Ук-Д84. 9. Адаптивные упреждатели многомерных нестационарных стохастических процессов/Е. В. Бодянский, И. П. Плисс, Х., 1986. 36 с. Деп. в УкрНИИТИ 30.01.86. № 706-Ук 86.*

Поступила в редколлегию 13.12.88

А. А. ЯРОШЕНКО, канд. биол. наук, Л. М. КОНОВАЛОВА, канд. техн. наук  
Ф. А. КРАСИНА

## МЕТОД СТРУКТУРНО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРА В ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Общепринятые статистические методы оценки качества выполнения человеком-оператором задачи управления динамическим объектом позволяют выносить суждения о качестве его работы и степени оптимальности кода, используемого в средствах отображения информации (СОИ), по конечному результату деятельности.

Однако, чтобы ответить на вопрос, за счет каких характерных особенностей поведения оператора достигается то или иное качество выполнения задачи управления, необходима разработка соответствующего метода, который позволял бы проводить анализ текущих событий, происходящих в процессе решения оператором задачи управления. Эти события характеризуются различными типами реакций оператора, обусловленными субъективными оценками сенсорной и кинестатической информации с учетом конечной целевой функции, задаваемой установкой, т. е. правилами выполнения задачи управления. Рассмотрим предлагаемый метод анализа деятельности оператора на примере решения задачи компенсаторного анализа слежения.

Основные обозначения и определения:  $\beta(t)$  — отслеживаемый сигнал, средняя скорость его изменения —  $V_{\beta}$ ;  $r(t)$  — сигнал, поступающий с органа управления, средняя скорость его изменения —  $V_r$ ;  $\varepsilon(t)$  — сигнал рассогласования между сигналами  $\beta(t)$  и  $r(t)$ ; «уровень индикации» — пороговая величина сигнала  $\varepsilon(t)$ , приводящая к изменению показаний индикатора; «зона нечувствительности» — пределы изменения сигнала  $\varepsilon(t)$ , соответствующие нулевому показанию индикатора; «уровни квантования» — заданные при обработке результатов пороговые величины сигнала  $\varepsilon(t)$ , позволяющие использовать единый масштаб для экспериментов с произвольным выбором уровней индикации; «микровременной интервал»  $\{t_i, t_{i+1}\}$  — интервал времени, ограниченный с двух сторон соседними моментами пересечения сигналом  $\varepsilon(t)$  заданных уровней квантования; «события» — сложившаяся в процессе управления на любом из микровременных интервалов ситуация, отражающая совместное изменение сигналов  $\beta(t)$  и  $r(t)$ .

Логические условия определения типа событий представлены в табл. 1.

Дальнейшая обработка этих событий на исследуемом интервале слежения может быть осуществлена двумя способами.

Суть первого способа заключается в оценке эмпирических вероятностей этих событий для каждого из пределов изменения сигнала  $\varepsilon(t)$ , задаваемых соседними уровнями квантования или уров-

## Логические условия определения типа события

Тип события	Условия для сигналов на границах микровременного интервала	Тип реакции	Соотношения скоростей $V_r, V_\beta$ на интервале $\{t_i, t_{i+1}\}$
C1	$z(t) > 0 \quad \beta_i < \beta_{i+1} \quad r_i < r_{i+1}$ $z(t) < 0 \quad \beta_i > \beta_{i+1} \quad r_i > r_{i+1}$	+ R	$V_r > V_\beta$
C2	$z(t_i) > 0$ $z(t) < 0 \quad \beta_i = \beta_{i+1} \quad r_i < r_{i+1}$ $z(t) < 0 \quad r_i > r_{i+1}$	+ R	$V_r > V_\beta$
C3	$z(t_{i+1}) > 0$ $z(t) > 0 \quad \beta_i > \beta_{i+1} \quad r_i < \beta_{i+1}$ $z(t) < 0 \quad \beta_i < \beta_{i+1} \quad r_i > \beta_{i+1}$	+ R	$V_r > V_\beta, V_r < V_\beta$
C4	$z(t) > 0 \quad \beta_i > \beta_{i+1} \quad r_i = r_{i+1}$ $z(t) < 0 \quad \beta_i < \beta_{i+1}$	- R	$V_r < V_\beta$
C5	$z(t) > 0 \quad \beta_i > \beta_{i+1} \quad r_i > r_{i+1}$ $z(t) < 0 \quad \beta_i < \beta_{i+1} \quad r_i < r_{i+1}$	- R	$V_r < V_\beta$
C6	$z(t) > 0 \quad \beta_i > \beta_{i+1} \quad r_i > r_{i+1}$ $z(t) < 0 \quad \beta_i < \beta_{i+1} \quad r_i < r_{i+1}$	+ R	$V_r < V_\beta$
C7	$z(t_i) < 0$ $z(t) < 0 \quad \beta_i = \beta_{i+1} \quad r_i > r_{i+1}$ $z(t) > 0 \quad r_i < r_{i+1}$	- R	$V_r > V_\beta$
C8	$z(t_{i+1}) > 0$ $z(t) > 0 \quad \beta_i < \beta_{i+1} \quad r_i > r_{i+1}$ $z(t) < 0 \quad \beta_i > \beta_{i+1} \quad \beta_i < r_{i+1}$	- R	$V_r > V_\beta, V_r < V_\beta$
C9	$z(t) > 0 \quad \beta_i < \beta_{i+1} \quad r_i > r_{i+1}$ $z(t) < 0 \quad \beta_i > \beta_{i+1} \quad r_i < r_{i+1}$	- R	$V_r > V_\beta$
C10	$z(t) > 0 \quad \beta_i < \beta_{i+1} \quad r_i = r_{i+1}$ $z(t) < 0 \quad \beta_i > \beta_{i+1}$	- R	$V_r < V_\beta$

нями индикации, что позволяет связать достигнутую точность управления с вероятностями событий и ответить на вопрос, за счет каких характерных событий произошло изменение качества выполнения задачи слежения при варьировании характеристик индикации, сигнала  $\beta(t)$ , органа управления или объекта управления.

Для второго способа анализа событий использован переход на язык более укрупненных понятий по правилам, отраженным на схеме (рисунок), где слева поставлены номера различных уровней предлагаемого анализа событий, зарегистрированных при выполнении компенсаторной задачи слежения. Уровни анализа характеризуются следующим образом.



Исходное событие	Последующее событие									
	В1	В2	В3	В4	В5	В6	В7	В8	В9	В10
A1	$R^*$	$R^*$	$R^*$	$-R_{nV}$	$-R_H$	$R_{-V}^*$	$-R$	$-R$	$-R$	$-R_{-nV}$
A2	$R^*$	$R^*$	$R^*$	$-R_{nV}$	$-R_H$	$R_{-V}^*$	$-R$	$-R$	$-R$	$-R_{-nV}$
A3	$R^*$	$R^*$	$R^*$	$-R_{nV}$	$-R_H$	$R_{-V}^*$	$-R$	$-R$	$-R$	$-R_{-nV}^*$
A4	$R$	$R$	$R$	$-R_{nV}$	$-R_{nV}^*$	$R_{-V}$	$-R$	$-R$	$-R$	$-R_{-nV}^*$
A5	$R$	$R$	$R$	$-R_{nV}$	$-R_{nV}^*$	$R_{-V}$	$-R^*$	$-R^*$	$-R^*$	$-R_{-nV}$
A6	$R_V^*$	$R_V^*$	$R_V^*$	$R_H$	$-R_H$	$R_{-V}^*$	$-R$	$-R$	$-R$	$-R$
A7	$R$	$R$	$R$	$P_{np}$	$-R_H^*$	$R_{-V}$	$-R^*$	$-R^*$	$-R^*$	$-P_{-np}$
A8	$R$	$R$	$R$	$R_{np}$	$-P_H^*$	$R_{-V}$	$-R^*$	$-R^*$	$-R^*$	$R_{-np}$
A9	$R$	$R$	$R$	$R_{np}$	$-R_H^*$	$R_{-V}$	$-R^*$	$-R^*$	$-R^*$	$R_{-np}$
A10	$R$	$R$	$R$	$-R_H^*$	$-R_H$	$-R_{-V}$	$-R^*$	$-R^*$	$-R^*$	$-R^*$

Примечание. Пояснения в тексте.

Отметим, что на этом этапе анализа вводятся дополнительные классификационные признаки событий. Все события разделяются на три класса. События, которым соответствуют близкие к нулю величины сигнала  $\epsilon(t)$  (в зоне условного «нулевого рассогласования»). Для них информативная значимость присваивается в соответствии с табл. 2 с дополнительным индексом 0. События, для которых величины сигнала  $\epsilon(t)$  находятся за границами условного нулевого рассогласования, но в пределах зоны нечувствительности. Таким событиям присваивается дополнительный индекс 3. И, наконец, события, для которых величины сигнала  $\epsilon(t)$  находятся за границами зоны нечувствительности. Для этих событий дополнительный индекс отсутствует (см. рисунок).

*Уровень 2.* На втором уровне анализа для той же последовательности микровременных интервалов вводится новая интерпретация событий, под определения которых попадает различное число характерных реакций первого уровня анализа (см. рисунок). При этом используется классификационный признак «направление движения» для всех событий, которым соответствует величина рассогласования, выходящая за границы зоны нечувствительности или границы условного нулевого рассогласования при отсутствии заданной зоны нечувствительности. События, выделяемые на этом уровне анализа, характеризуются следующим образом.  $R_{\text{ош}}^{*-}$  — ошибочная реакция в результате сохранения направления движения, характерного для предыдущего микровременного интервала; рассогласования на анализируемом микровременном интервале увеличилось.  $R_{\text{ош}}^{-}$  — ошибочная реакция из-за неоправданного изменения направления движения рукоятки управления; рассогласование увеличилось.  $R_{\text{ош}}^{*+}$  — ошибочная реакция вследствие сохранения направления движения рукоятки управления, характерного для предыдущего временного интервала и не соответствующего установке на анализируемом микровременном интервале; рассогласование уменьшилось и возникла ситуация неопределенности;  $R_{\text{ош}}^{+}$  — ошибочная реакция из-за изменения направления движения рукоятки управления; рассогласование уменьшилось, нарушилась заданная установка на движение и возникла ситуация неопределенности;  $R_R^{*-}$  — реакция на компенсацию (реакция, выполняемая согласно заданному правилу поведения) без смены направления движения рукоятки; рассогласование увеличилось, так как  $V_r < V_{\beta}$ ;  $R_R^{-}$  — реакция на компенсацию со сменой направления движения рукоятки, рассогласование увеличилось, так как  $V_r < V_{\beta}$ ;  $R_R^{*+}$  — реакции на компенсацию соответственно со сменой и без смены направления движения рукоятки; рассогласование уменьшилось.

События, характеризующиеся реакциями  $R_V^{*+}$  и  $R_V^{*-}$ , выделяются для того, чтобы на последующем, четвертом уровне анализа выявить временные интервалы, на которых слежение осуществляется путем корректировки скорости движения рукоятки управления. При этом событие  $R_V^{*-}$  характеризуется реакцией без смены направления движения рукоятки в случае отставания по скорости изменения сигнала  $r(t)$  от сигнала  $\beta(t)$ , что приводит к увеличению рассогласования.

Значение  $R_V^{*-}$  присваивается событию  $R_{-V}^{*}$  первого уровня, если на последующем временном интервале имелось событие  $R_V^{*}$  или  $R_{-V}^{*}$  при любом событии первого уровня, присваивается значение  $R_R^{*-}$ . Событие  $R_V^{*+}$  характеризуется реакцией без смены направления движения рукоятки, отражающей опережение по скорости изменения сигналом  $r(t)$  сигнала  $\beta(t)$  и приводящей к уменьшению рассогласования. Значение  $R_V^{*+}$  присваивается событию

$R_{\nu}^*$  первого уровня, если на предыдущем интервале имелось событие  $R_{-\nu}^*$  в случае другого события первого уровня, присваивается значение.

Остальные события второго уровня анализа отражают варианты использования прогноза и характеризуются  $R_n^+ - R_n^-$  — реакциями без смены и со сменой направления движения рукоятки, приводящими к увеличению рассогласования и отражающими ситуации неточного прогноза за пределами зоны нечувствительности и условного «нулевого рассогласования»;

$R_n^+ R_{n-}^{*+}$  — реакциями со сменой и без смены направления движения рукоятки, способствующими уменьшению рассогласования и отражающими ситуации точного прогноза за пределами зоны нечувствительности и условного нулевого рассогласования;

$R_{n3}^+$  — реакциями оператора, обуславливающими уменьшение рассогласования при отсутствии информации о величине и скорости изменения сигнала  $\varepsilon(t)$  (точный прогноз в пределах зоны нечувствительности);  $R_{n3}^-$  — реакциями оператора, вызывающими возрастание рассогласования при нулевом показании индикатора (неточный прогноз в пределах нечувствительности);

$R_{n0}$  — сигнал рассогласования отсутствует, параметры системы в норме (точный прогноз при условно «нулевом рассогласовании»).

*Уровень 3.* События третьего уровня анализа группируются по классификационному признаку «изменение модуля амплитуды сигнала  $\varepsilon(t)$ ». Эти события для полученных после объединения на 2 уровне временных интервалов характеризуются такими реакциями:

$R_{oш}^-, R_{oш}^+$  — ошибочные реакции, соответственно, увеличивающие и уменьшающие рассогласование;

$R_R^-, R_R^+$  — реакции на компенсацию, соответственно, увеличивающие и уменьшающие рассогласование;

$R_V^-, R_V^+$  — реакции, отражающие соотношение средних скоростей сигналов  $r(t)$  и  $\beta(t)$  и, соответственно, увеличивающие рассогласование  $|V_r < V_\beta|$  и уменьшающие его  $|V_r > V_\beta|$ ;

$R_n^-, R_n^+$  — реакции, соответственно, увеличивающие и уменьшающие рассогласование и отражающие ситуации неточного и точного прогноза;

$R_{n3}^+, R_{n3}^-$  — реакции, отражающие точный и неточный прогноз в пределах зоны нечувствительности, включая зону условного «нулевого рассогласования».

*Уровень 4.* События этого уровня анализа характеризуются:

$R_{oш}$  — ошибочными реакциями;

$R_h$  — реакциями на компенсацию;

$R_V$  — реакциями, отражающими корректировку скорости движения;

$R_n$  — реакциями, отражающими ситуацию прогноза.

*Уровень 5.* Характеризуется объединением всех временных интервалов, события на которых или переход к другим событиям связаны с необходимостью использования оператором информации о знаке сигнала  $\varepsilon(t)$  ( $\Sigma_{R_{н}}$ ), а также — информации о знаке и скорости изменения сигнала  $\varepsilon(t) / \Sigma_{R_{ан.1}}$ .

*Уровень 6.* На данном уровне представлен интервал компенсаторного слежения (ИКС), включающий весь анализируемый интервал времени выполнения оператором задачи компенсаторного слежения.

Для уровней анализа 2, 3, 4 производится объединение рядом стоящих временных интервалов, имеющих одинаковые обозначения событий.

Качественный анализ особенностей работы оператора при выполнении задачи управления включает определение эмпирических вероятностей событий каждого типа для уровней анализа 2—4, а также расчет следующих временных характеристик событий: минимальных и максимальных длительностей, средних длительностей и соответствующих им среднеквадратических отклонений для уровней анализа 2—4. На 6-м уровне анализа используются общепринятые статистические оценки качества выполнения задачи управления. Кроме того, для каждого события, начиная с 6-го уровня, может быть определен относительный вклад событий любого из вышележащих уровней.

Предложенный метод реализован в виде подпрограмм анализа экспериментальных данных в автоматизированной методике исследования деятельности человека-оператора при выполнении им задачи управления на базе комплекса Электроника-60-КАМАК.

*Поступила в редколлегию 14.05.88*

АДК 519.95

*Н. И. САМОЙЛЕНКО*, канд. техн. наук

## СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МНОГОЗНАЧНОГО КОДОВОГО ДЕРЕВА С МИНИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ

Вопросам минимизации нерегулярных кодовых деревьев уделяется большое внимание [1]. Однако разработанные до сих пор алгоритмы носят квазиоптимальный характер. Ранее [2] был предложен оптимальный алгоритм, но применительно только к двоичным кодовым деревьям.

Нами обобщены результаты [2] на многозначные логические структуры. Предлагаемый алгоритм позволяет получать математические модели деревьев с минимально возможным количеством конечных вершин по заданной  $m$ -значной логической функции.

Функция в  $m$ -значной логике может быть задана в виде обобщенной дизъюнктивной нормальной формы (ДНФ) [3]

$$f(x_1, \dots, x_n) = \bigvee_{(\sigma_1, \dots, \sigma_n)} I_{\sigma_1}(x_1) \text{ and } \dots \text{ and } I_{\sigma_n}(x_n) \text{ and } f(\sigma_1, \dots, \sigma_n), \quad (1)$$

где

$$J_{\tau_i}(x_i) = \begin{cases} m-1 & \text{при } x=i, \\ 0 & \text{при } x \neq i \quad (i=1, n); \\ \tau_i \in \{0, 1, \dots, m-1\}. \end{cases}$$

Одной и той же функции (1), учитывая транспозицию конечных вершин, можно поставить в соответствие

$$D(n, m) = \prod_{j=1}^n j^{m^j - j} \quad (2)$$

различных неминимизированных деревьев. Тогда задача поиска дерева с минимальной структурой может быть решена путем прямого перебора. Метод прямого перебора заключается в построении всех возможных деревьев в количестве (2), их несложной графической минимизации и выбора среди минимизированных деревьев оптимального путем простого сравнения.

При значности логики  $m > 4$  и количестве переменных  $n > 4$  метод прямого перебора неосуществим даже с помощью самых быстродействующих ЭВМ из-за больших затрат времени счета. Так, при  $n=m=5$  число просчитываемых вариантов согласно (2) достигает астрономической величины  $D(5,5) \approx 10^{50}$ . Отсюда необходимость разработки методов оптимизации кодовых деревьев, исключающих прямой перебор, очевидна.

Исследования показывают, что нет принципиальных трудностей к созданию строгих алгоритмов оптимизации на основе математического аппарата  $m$ -значной логики. Но, учитывая возрастающую сложность формул тождественных преобразований  $m$ -значных функций с ростом  $m$ , представляется более целесообразным минимизацию  $m$ -значных деревьев осуществлять в пространстве двоичных переменных по уже разработанному [2], но незначительно скорректированному алгоритму.

Таблица 1

Кодирование трехзначных переменных в двоичном коде

$x_i$	$x_{i1}$	$x_{i2}$
0	0	0
1	0	1
2	1	0
*	1	1

Таблица 2

Истинность функции  $f(x_1, x_2)$

$x_1$	$x_2$	$f(x_1, x_2)$	$x_1$	$x_2$	$f(x_1, x_2)$	$x_1$	$x_2$	$f(x_1, x_2)$
0	0	0	1	0	0	2	0	0
0	1	1	1	1	1	2	1	0
0	2	2	1	2	2	2	2	2

Перевод  $m$ -значной функции в пространство двоичных переменных достигается перекодированием  $m$ -значных переменных функции в двоичные. Перекодирование требует ввода для каж-

дой  $m$ -значной переменной  $x_i$  ( $i = \overline{1, n}$ )  $k$  новых булевых переменных  $x_{ij}$  ( $i = \overline{1, n}$ ;  $j = \overline{1, k}$ ), где  $k = \lceil \log_2 m \rceil$ . Если  $\log_2 m$  не является целым числом, то перекодирование приводит к появлению частичной (не всюду определенной) функции. Например, перекодирование значений трехзначной переменной производится в соответствии с табл. 1, которая включает избыточный двоичный код 11. Символом «звездочка» в ней отмечено безразличное значение трехзначной переменной. Наличие безразличных значений и приводит при перекодировании к появлению частичных функций. Частичные функции не препятствуют использованию алгоритма синтеза оптимальной математической модели двоичного дерева из [2], поскольку все положения теории ДНФ справедливы и для частичных функций [2].

Логические функции, получаемые в результате перекодирования, в общем случае не являются булевыми, хотя и задаются (частично или полностью) с помощью двоичных переменных. Объясняется это тем, что перекодированию подвергаются только значения аргументов функции, а значения самой функции остаются  $m$ -значными. Последнее обстоятельство требует незначительной коррекции алгоритма. Скорректированный алгоритм применительно к функциям многозначной логики описывается следующим образом.

Алгоритм оптимизации. Исходная функция (1) после перевода в пространство двоичных переменных представляется в виде системы совершенных ДНФ:

$$f(X) = \begin{cases} f_0(X) = \bigvee_{(\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{nk})} x_{11}^{\alpha_{11}} x_{12}^{\alpha_{12}} \dots x_{nk}^{\alpha_{nk}}, \\ f(\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{nk}) = 0 \\ \dots \\ f_{m-1}(X) = \bigvee_{(\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{nk})} x_{11}^{\alpha_{11}} x_{12}^{\alpha_{12}} \dots x_{nk}^{\alpha_{nk}}, \\ f(\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{nk}) = m-1 \end{cases} \quad (3)$$

где  $X = \{x_{ij}^{\alpha_{ij}}\} (i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k})$ ;  $x_{ij}^{\alpha_{ij}} \begin{cases} x_{ij} & \text{при } \alpha_{ij} = 0, \\ x_{ij} & \text{при } \alpha_{ij} = 1. \end{cases}$

На первом шаге оптимизации известными методами [3] определяется система кратчайших ДНФ

$$f_{кр}(X) = \{f_{кр_0}(X), f_{кр_1}(X), \dots, f_{кр_{m-1}}(X)\}, \quad (4)$$

где  $f_{кр_0}(X)$  — кратчайшая ДНФ для булевой функции  $f_0(X)$ ;  $f_{кр_1}(X)$  — для  $f_1(X)$  и т. д.

Затем каждая  $i$ -я система

$$f_{кр}(X) \text{ and } \bigvee_{(\gamma_1, \dots, \gamma_k)} x_{i1}^{\gamma_1} \dots x_{ik}^{\gamma_k} =$$

$$= \begin{cases} f_{кр_0}(X) \text{ and } \bigvee_{(\gamma_1, \dots, \gamma_k)} x_{i_1}^{\gamma_1} \dots x_{i_k}^{\gamma_k}, \\ \dots \\ f_{кр_{m-1}}(X) \text{ and } \bigvee_{(\gamma_1, \dots, \gamma_k)} x_{i_1}^{\gamma_1} \dots x_{i_k}^{\gamma_k}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\gamma_1, \dots, \gamma_k$  — избыточный набор значений переменных  $x_{ij}$  в таблице перекодирования,

$$x_{ij}^{\gamma_j} = \begin{cases} \overline{x_{ij}} & \text{при } \gamma_j = 0, \\ x_{ij} & \text{при } \gamma_j = 1 \end{cases} \quad (j = \overline{1, k}),$$

приводится к дизъюнктивной нормальной форме  $f_{нор_i}(x)$ . Такое приведение равносильно вставке дизъюнкции  $\bigvee_{(\gamma_1, \dots, \gamma_k)} x_{i_1}^{\gamma_1} \dots x_{i_k}^{\gamma_k}$  во все конъюнктивные члены (импликанты) системы (5), в которых переменные  $x_{ji}$  не представлены полностью, и их раскрытию. В каждой системе  $f_{нор_i}(X)$  реализуются все возможные операции логического поглощения с целью получения из  $f_{нор_i}(X)$  логического выражения  $f_{нор_i}(X)$  с минимальным количеством импликант  $G_i$ . Минимальное значение

$$G_q = \min_{i=\overline{1, n}} G_i \quad (6)$$

укажет на  $m$ -значную переменную  $x_q$ , которой соответствует начальная (корневая) вершина кодового дерева с оптимальной структурой для заданной  $m$ -значной логической функции. Выражение (6) является критерием принятия решения о выборе той или иной  $m$ -значной переменной в качестве очередной вершины дерева на каждом шаге оптимизации.

Первый шаг алгоритма заканчивается разложением  $q$ -го выражения  $f_{нор_q}(X)$  по переменным  $x_{qi}$  ( $i = \overline{1, k}$ )

$$f_{нор_q}(X) = \bigvee_{\gamma_1, \dots, \gamma_k} x_{q_1}^{\gamma_1} \dots x_{q_k}^{\gamma_k} \text{ and } [f_{кр}(X | x_{q_j}^{\gamma_j})], \quad (7)$$

где  $f_{кр}(X | x_{q_j}^{\gamma_j})$  — компоненты разложения, представляющие собой кратчайшие ДНФ логических функций  $f(X | x_{q_j}^{\gamma_j})$ .

На втором шаге алгоритма оптимизации для каждой компоненты разложения (7) повторяется процедура первого шага за исключением определения кратчайших ДНФ, так как они получаются автоматически в результате разложения (7) на предыдущем шаге.

Итерационный процесс оптимизации заканчивается, когда все компоненты очередного разложения будут зависеть только от переменных  $x_{ij}$  ( $i = \text{const}$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, k\}$ ), которые соответствуют только одной  $m$ -значной переменной  $x_i$ .

По окончании итерационного процесса оптимизации полное разложение кратчайшей ДНФ  $f_{кр}(X)$  переводится из пространства

двоичных переменных в исходное —  $m$ -значное. Обратный перевод осуществляется с помощью все тех же таблиц перекодирования. Например, перевод в трехзначное пространство по табл. 1. Результатом перевода является разложение кратчайшей ДНФ  $m$ -значной функции  $f(x_1, \dots, x_n)$  по всем переменным  $x_i$  ( $i=1, n$ ), которое и будет представлять собой математическую модель оптимального  $m$ -значного кодового дерева. Каждому скобочному выражению в разложении соответствует определенное поддерево. Чем глубже вложенность скобочного выражения, тем дальше от начальной вершины  $x_q$  находится корневая вершина поддерева.

Если в процессе оптимизации минимальное значение критерия (6) будет соответствовать двум, трем и т. д. переменным, то минимизированное кодовое дерево будет иметь соответственно две, три и т. д. оптимальные структуры, равные между собой по сложности.

Рассмотрим синтез математической модели оптимального  $m$ -значного кодового дерева по изложенному алгоритму на конкретном примере.

**Пример.** Пусть некоторая логическая структура задана логической функцией трехзначной логики  $f(x_1, x_2)$  в виде табл. 2. Необходимо получить математическую модель связанного трехзначного кодового дерева с минимально возможным числом неконечных вершин, не нарушая истинности заданной функции  $f(x_1, x_2)$ .

**Решение.** Использование описанного алгоритма оптимизации предполагает предварительный перевод заданной функции многозначной логики (в данном примере — трехзначной) в пространство двоичных переменных. Для этой цели воспользуемся табл. 1, тогда таблица истинности заданной функции примет вид табл. 3.

Таблица 3

Истинность функции  $f(X)$ ,  $X = \{x_{ij}\}$  ( $i, j = 1, 2$ )

$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{21}$	$x_{22}$	$f(X)$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{21}$	$x_{22}$	$f(X)$
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	1	0
0	0	1	0	2	1	0	1	0	2
0	0	1	1	*	1	0	1	1	*
0	1	0	0	0	1	1	0	0	*
0	1	0	1	1	1	1	0	1	*
0	1	1	0	2	1	1	1	0	*
0	1	1	1	*	1	1	1	1	*

Согласно первому шагу алгоритма определяем любым известным методом [3] систему кратчайших ДНФ:

$$f_{кр}(X) = \begin{cases} f_{кр_0}(X) = \bar{x}_{21} \bar{x}_{22} \vee x_{11} x_{22}, \\ f_{кр_1}(X) = \bar{x}_{11} x_{22}, \\ f_{кр_2}(X) = x_{21}. \end{cases} \quad (8)$$

На самом деле, заданная функция имеет несколько систем кратчайших ДНФ, но для простоты иллюстрации алгоритма ограничимся одной.

Затем для получения логических выражений  $f_{np_i}(X) (i=1, 2)$  вводим в (8) согласно табл. 1 поочередно скобки  $(\bar{x}_{i_1} \bar{x}_{i_2} \vee x_{i_1} x_{i_2} \vee x_{i_1} \bar{x}_{i_2})$  и производим все возможные операции логического поглощения. Получим  $n$  систем:

$$f_{np_1}(X) = \begin{cases} \bar{x}_{11} \bar{x}_{12} \bar{x}_{21} \bar{x}_{22} \vee \bar{x}_{11} x_{12} \bar{x}_{21} \bar{x}_{22} \vee x_{11} \bar{x}_{12} \bar{x}_{21} \bar{x}_{22} \vee x_{11} \bar{x}_{12} x_{21} \bar{x}_{22}, \\ \bar{x}_{11} x_{12} x_{22} \vee \bar{x}_{11} x_{12} x_{22}, \\ x_{11} x_{12} x_{21} \vee \bar{x}_{11} x_{12} x_{21} \vee x_{11} \bar{x}_{12} x_{21}; \end{cases}$$

$$f_{np_2}(X) = \begin{cases} \bar{x}_{21} \bar{x}_{22} \vee x_{12} \bar{x}_{21} x_{22}, \\ x_{11} x_{21} x_{22}, \\ x_{21} \bar{x}_{22}. \end{cases}$$

Критерий (6) определяет переменную  $x_2$  как соответствующую начальной вершине дерева. Разложим  $f_{np_2}(X)$  по переменным  $x_{2j} (j=1, 2)$

$$f_{np_2}(X) = \begin{cases} \bar{x}_{21} x_{22} \vee x_{21} \bar{x}_{22} (x_{12}), \\ \bar{x}_{21} \bar{x}_{22} (\bar{x}_{12}), \\ x_{21} (x_{22}). \end{cases} \quad (9)$$

Поскольку в рассматриваемом примере  $n=2$ , то в следующем шаге оптимизации нет необходимости. Действительно, компоненты разложения зависят только от одной переменной  $x_1$ .

В пространстве трехзначных переменных система (9) примет вид

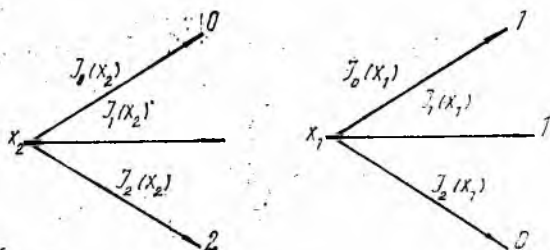
$$f_{np_2}(x_1, x_2) = \begin{cases} I_0(x_2) [0] \vee I_1(x_2) [I_2(x_1) \cdot 0], \\ I_1(x_2) [I_0(x_1) \cdot 1 \vee I_1(x_1) \cdot 1], \\ I_2(x_2) [2]. \end{cases} \quad (10)$$

Сворачивая (10) в одно логическое выражение, получим

$$f(x_1, x_2) \equiv I_0(x_2) \cdot 0 \vee I_1(x_2) [I_0(x_1) \cdot 1 \vee I_1(x_1) \cdot 1 \vee I_2(x_1) \cdot 0] \vee I_2(x_2) \cdot 2. \quad (11)$$

Логическое выражение (11) представляет собой математическую модель оптимального трехзначного кодового дерева для заданной логической функции  $f(x_1, x_2)$ .

Графическое построение дерева (рисунок) по скобочному выражению (11) не представляет труда.



Графическое построение дерева по (11)

При построении дерева в общем случае следует руководствоваться следующими правилами: любое скобочное выражение  $\bigvee_{j=0,1,\dots,m-1} J_j(x_i)[\dots]$  математической модели определяет дерево или

поддерево с корневой вершиной  $x_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ); элементарной функции  $I_j(x_i)$  соответствует дуга дерева с кодом  $j$ , т. е.  $x_i \equiv j$ ;  $m$ -значным константам  $0, 1, \dots, m-1$  математической модели соответствуют одноименные конечности вершины дерева.

Предложенный алгоритм минимизации логических структур, заданных  $m$ -значными логическими функциями, основан на определении кратчайших ДНФ  $m$  булевых функций. Следовательно, при больших  $n$  и  $m$  он может быть реализован на ЭВМ, математическое обеспечение которых позволяет минимизировать многоместные булевы функции соответствующих порядков.

**Список литературы:** 1. Блох А. Ш. Граф-схемы и их применение. Минск 1975. 302 с. 2. Самойленко Н. И. Синтез математической модели оптимальной структуры кодового дерева // Пробл. фоники. 1987. Вып. 38. С. 84—89. 3. Дискретная математика и математические вопросы кибернетики // Под ред. С. В. Яблонского и О. Б. Лупанова. М., 1974. Т. 1. С. 9—98.

Поступила в редколлегию 23.10.87

УДК 681.3(086.8)

И. И. ДЕНИСЕНКО, канд. техн. наук

**ОРГАНИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИИ КЛАССИФИКАЦИИ  
В ВОЛНОВОЙ НЕЙРОДИНАМИКЕ**

Волновой характер распространения электрической активности нервных клеток был установлен Левви более 50 лет назад. Позднее А. А. Ухтомский высказал предположение, что электрические

волны и химические процессы не противоречат, а дополняют друг друга. Тем не менее принципы нейродинамики разрабатывались основоположниками кибернетики (Винер, Джон фон Нейман, Мак-Каллок и Питс, Клини...) без учета дискретно-волновых принципов самоорганизации. Существенный результат этого направления — выделение операции классификации в качестве основной в функционировании систем мозга [1].

Впервые предпосылки волновой нейродинамики как идеологии изложены в работе [2] в приложении к задаче построения ассоциативных классифицирующих сред, на которых и проверена работоспособность дискретно-волновых принципов классификации. Это направление формируется на основе уже известных данных отечественных и зарубежных авторов под непосредственным влиянием кибернетических идей отдела нейрофизиологии ИЭМ АН СССР, главной из которых является утверждение связи автономных паттернов с психической деятельностью человека [3]. Здесь же в 1981 году состоялось первое обсуждение дискретно-волновой концепции функционирования нейронных сетей. В основу структурной организации нейронных сетей положены принципы общего пути А. А. Ухтомского и парности представления проводящих путей И. П. Павлова. По гистологическим данным нисходящие и восходящие пути со взаимным воздействием друг на друга образуют системы, в которых разделительные функции реализуются на основе ассоциативных дискретно-волновых процессов, удовлетворяющих следующим постулированным предложениям [2]: память центральной нервной системы распределена по мозговым структурам; причиной пополнения памяти являются волны активности, представленные в виде распространяющихся вглубь структур приращений интенсивности клеточных разрядов: информация о классифицируемом сигнальном образе заключена в системе возбужденных сигнальных путей [4], неявно выраженных в ассоциативных зонах и явно выраженных на границах раздела структуры. В сечении нейронной сети формируется пространственно-временная мозаика — паттерн [3]: на этапе обучения должны присутствовать прямой ориентирующий и обратный модулирующий потоки волн активностей. В обученной структуре эти потоки могут быть независимы. В дальнейшем протекают медленные процессы подобучения и закрепления систем сигнальных путей за счет обратных аксо- и дендротоков белковых веществ [5]. В качестве очистительной процедуры от незначимой информации выделяется феномен забывания, реализуемый на клеточном уровне; в качестве процедуры, приводящей к дифференциации состояний смежных клеток, — латеральное торможение [6], а в качестве отработки уровня возбуждения дендритного дерева — возвратное самоторможение; нервные клетки обладают многофункциональностью в смысле участия в формировании сигнальных путей от разных сигнальных образов (раздражителей); в нейронных сетях всегда присутствуют гибкий, индивидуального приобретения и жесткий, генетический механизмы памяти.

Формально нейронную сеть можно задать тремя объектами  $\langle G, \Phi, V \rangle$ , где  $G = (X, F)$  — граф связей клеток, заданный множеством клеток  $X$  и множеством отображений  $F$  множества  $X$  в  $X$ ;  $\Phi$  — множество обобщенных функций нейронов;  $V$  — функция управления сетью.

Под физиологическим понятием «обучение» в структуре с гибкой памятью понимается преобразование вида

$$\begin{array}{c} F, \Phi \\ \Omega \rightarrow R \\ V_1 + V_2 \end{array} \quad (1)$$

где  $\Omega$  — сигнальный образ;  $R$  — код-ответ структуры;  $V_1, V_2$  — исходящее и входящее управления. Объекты  $V_1$  и  $V_2$  задаются в виде внутренних (управляющих) сигнальных образов и несут функции межструктурной модуляции. Множество обобщенных функций  $\Phi$  специфично для каждой из систем, поэтому ниже будут изложены лишь общие предпосылки. Если система замкнута, т. е. обеспечивает и запись, и воспроизведение сигнальных образов, то обучение протекает посредством двух взаимных преобразований

$$\begin{array}{c} F_1, \Phi_1 \\ \Omega \rightarrow R \\ V_1 + F_2, \Phi_2 + V_2 \\ \omega \leftarrow r \end{array} \quad (2)$$

где  $\{F_1, \Phi_1\}$  и  $\{F_2, \Phi_2\}$  — преобразования соответственно в первой и второй структурах;  $\omega$  — воспроизведенный сигнальный образ;  $r$  — прообраз кода-ответа. Данной схемой утверждается парный принцип взаимодействия нейронных сетей.

Как следует из схем (1) и (2), возможно объединение любого числа структур в систему, в том числе и неполный цикл, преобразованный типа записи без воспроизведения. В этом случае система на каждый сигнальный образ  $\Omega$  формирует код-ответ  $R$  под воздействием сторонней модуляции  $V_2$ . Из построения схемы (2) следует, что процедуры классификации и воспроизведения идентичны. В реализации процедуры классификации должны участвовать две структуры. Поскольку на пространственное положение структур ограничений нет, то рассмотрим два предельных случая: двухструктурную и одноструктурную организации систем нейронных сетей. В силу стохастичности архитектур как самих структур, так и межструктурных отображений возможны следующие отношения между  $\Omega, \omega$  и  $r, R$ .

**Предложение 1.** При двухструктурной организации системы нейронных сетей поэлементное соответствие между  $\Omega, \omega$  и  $r, R$  недостижимо.

**Предложение 2.** При одноструктурной организации системы нейронных сетей возможно поэлементное соответствие между  $\Omega, \omega$  и  $r, R$ .

Назовем приведенную систему полной. Ее характерной особенностью является формирование явно выраженных сигнальных пу-

тей лишь во входном и выходном слоях. Центральная часть каждой из структур образуется мелкими «безынерционными» клетками, обеспечивающими «перемешивание» волн активностей, исходящих от каждого возбужденного афферента. Модулирующие воздействия могут входить только в граничные слои и исходить только из граничных слоев. С этой точки зрения рассмотрим строение коры головного мозга. По гистологическим данным Лоренте де Но архитектура коры представляется повторяющимися «триадами». Вслед за первым — афферентным слоем, следует слой очень мелких зернистых клеток (зернистая среда), за которым идет слой пирамидных клеток, являющийся входным для следующей триады. Затем повторяется зернистая среда и заканчивается эта часть также слоем пирамидных клеток. Причем в афферентных и выходных слоях обнаружены клетки, ориентированные встречно. По мнению автора, эти клетки помимо регуляторных функций несут и функции обратной афференции.

Приведенная архитектура не согласуется с описанной выше полной схемой классификации. Здесь не обнаружены зернистые клетки, ориентированные встречно. Однако необходимо иметь в виду такие обстоятельства. Поскольку электрические импульсы распространяются только по аксо-дендритным системам, то и направления передачи волн активностей полностью определяются архитектурой межклеточных связей. В этой части сформулируем следующее.

**Предложение 3.** *Зернистая среда обеспечивает распространение пересекающихся волн активностей в пространстве, определенной морфологией аксо-дендритных систем клеток.* Данным предложением утверждается предположение, что в ассоциативных зонах электрические волны, проникая взаимно (в том числе и встречно), интерферируют, как это происходит с электромагнитными волнами в непрерывном пространстве. Это приводит к тому, что при достаточной связности зернистых клеток состояние каждой пирамидной клетки в любой момент времени определяется всей мозаикой возбужденных афферентов. В этом плане мозговые структуры проявляют голографический эффект. Но в отличие от голографических систем обратного преобразования здесь не требуется. Мозговая структура на предъявленный сигнальный образ  $\Omega$  формирует код-ответ  $R$ , являющийся автономным паттерном, под воздействием модулирующего управления  $V_2$ . Так как параметры всех элементов системы изменяются медленнее, чем процесс подобучения, то описанная система представляет собой систему памяти. В качестве общих ограничений на множество обобщенных функций  $\Phi$  необходимо отметить, что первые два слоя триады должны обладать памятью только относительно преобразования волн активностей (жесткой памятью) и лишь пирамидные клетки — способностью к гибкой (индивидуально приобретаемой) памяти. На основании этих данных некоторые исследователи делают вывод о том, что функция памяти связана не с объектами мозга, а с его объемом.

Относительно обратного преобразования (воспроизведения) сигнального образа  $\Omega$ . В соответствии со схемой (2) процесс воспроизведения может быть обеспечен включением встречной классифицирующей системы. Но в качестве исходного сигнального образа используется прообраз кода-ответа, выполняющий функции «учителя». Воспроизведенный сигнальный образ  $\omega$  здесь может выполнять регуляторные функции и также может не иметь полэлементного соответствия.

Таким образом, троичный принцип организации нейронных сетей отмечается в мозжечке, гиппокампе, спинном мозгу. Поскольку каждая из частей одной триады может служить составной частью другой триады и наряду с характерными функциями каждой из частей могут осуществляться любые постоянные преобразования, то описанная схема может выступать как универсальный прием различения внутренних стимулов, положенный природой в основу организации мозга.

**Список литературы:** 1. *Hebb D. O.* The organization of behavior. N.-Y., 1949. P. 120. 2. *Денисенко Н. И.* Основные требования к ассоциативным классифицирующим средам как моделям мозговых структур // Пробл. бионики. 1983. Вып. 30. С. 101—108. 3. *Бехтерева Н. П.* Нейрофизиологические аспекты психической деятельности человека. Л., 1974. 174 с. 4. *Дейч С.* Модели нервной системы. М., 1970. 520 с. 5. *Глебов Р. Н., Крыжановский Г. Н.* Функциональная биохимия синапсов. М., 1978. 226 с. 6. *Анохин П. К.* Системные механизмы высшей нервной деятельности. М., 1975. 455 с.

*Поступила в редколлегию 09.04.87*

УДК 681.3:007.52

*Г. А. ГАЛУЕВ*

### **ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА МЕДИАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ НЕЙРОНОПОДОБНЫХ СТРУКТУР**

Согласно анализу работ в области обработки изображений одной из основных проблем, возникающих при создании эффективных систем обработки зрительной информации, является наличие противоречия между двумерностью фотометрической картины внешнего мира и одномерностью процесса ее последовательной обработки традиционными средствами вычислительной техники (ЭВМ) [1]. По мнению специалистов [1] наиболее перспективный путь решения указанной проблемы — разработка параллельных методов и средств обработки зрительной информации. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, связанные с разработкой принципов построения и алгоритмов функционирования параллельных систем обработки изображений.

Одним из самых многообещающих подходов к созданию параллельных систем обработки изображений представляется изу-

чение принципов организации и функционирования зрительных систем живых организмов [2]. Такой подход, получивший название нейробионического [2, 3], предполагает создание моделей нейронных сетей зрительного анализатора на базе нейроноподобных элементов, являющихся функциональными аналогами нервных клеток. Указанные выше модели не имеют прямых биологических прототипов, но отвечают общим принципам их организации и функционирования, основным среди которых служит принцип параллельных вычислений, используемый в процессе обработки зрительной информации.

Для наглядности дальнейших рассуждений будем полагать, что объекты внешней среды воспринимаются некоторой матрицей светочувствительных элементов размерностью  $n \times n$ . На выходе матрицы светочувствительных элементов формируется матрица  $|A|$  чисел  $a_{i,j}$  ( $i, j=1, 2, \dots, n$ ), значения которых в цифровой форме определяют выходные сигналы светочувствительных элементов и соответствуют точкам исходного изображения некоторого участка внешней среды. При этом элементы  $a_{i,j}$  (т. е. точки изображения) матрицы  $|A|$  в общем случае могут принимать множество различных значений от 0 до некоторой величины  $2^{k'}$ , где  $k'$  — число двоичных разрядов, отводимое для кодирования значений выходных сигналов светочувствительных элементов. Как правило, считается, что некоторая точка  $a_{i,j} > 0$ , если она принадлежит изображению объекта внешней среды, и  $a_{i,j} = 0$  в противном случае. Таким образом, матрица  $|A|$  дает всю исходную информацию об изображении объектов в некотором участке внешней среды. Однако на практике матрица  $|A|$  наряду с полезной информацией об изображении содержит и ложную информацию, появляющуюся в результате воздействия различного рода помех [1, 4, 5]. Как показывают экспериментальные исследования [1, 4, 5], наиболее распространенным типом помех является появление случайно распределенных единичных возбужденных элементов светочувствительной матрицы, а также наличие случайных выбросов, при которых значение выходного сигнала  $a_{i,j}$  светочувствительного элемента может существенно образом отличаться от значений выходных сигналов соседних с ним элементов. На изображении эти помехи проявляются в виде случайно распределенных искажающих точек, что существенно усложняет дальнейшую обработку и анализ изображений. В связи с этим следует прибегать к фильтрации, чтобы устранить ложную информацию в виде помех, т. е. улучшить изображение. С этой целью используют метод пространственной регуляции, который получил широкое распространение в цифровой обработке изображений [1, 4, 5]. Однако, несмотря на относительную простоту и легкость параллельной реализации, метод пространственной регуляризации обладает рядом существенных недостатков, одним из них является эффект размывания краев изображений [1, 4]. Наряду с этим, данный метод не позволяет осуществлять фильтрацию помех в виде случайных изолированных единичных точек на поле изображения. Отмечен-

ные обстоятельства существенным образом снижают эффективность и возможности практического применения указанного метода при обработке изображений. Для устранения недостатков был предложен метод медианы [1, 6] — наиболее эффективный и широко распространенный метод фильтрации помех. Суть этого метода заключается в последовательной замене каждой  $a_{i,j}$  точки изображения ее медианой, которая определяется для окрестности данной точки размерностью  $B \times B$ . На практике размерность окрестности данной  $a_{i,j}$  точки изображения, как правило, вы-

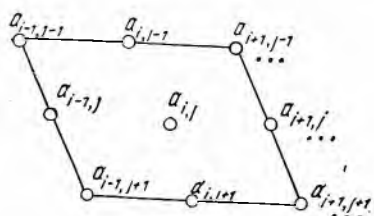


Рис. 1. Точка  $a_{i,j}$  изображения и ее окрестности размером  $3 \times 3$

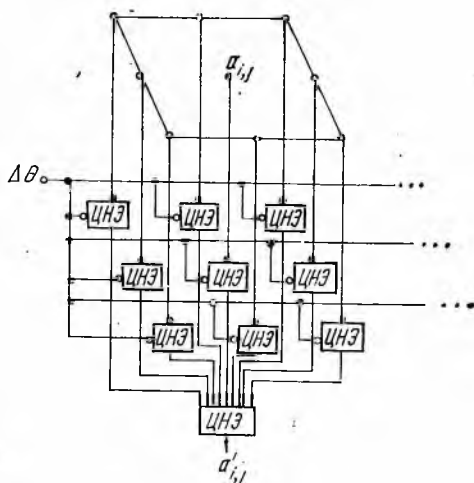


Рис. 2. Фрагмент цифровой нейроподобной структуры для параллельной реализации метода медианной фильтрации

бирается  $3 \times 3$  (рис. 1). Для определения медианы каждой  $a_{i,j}$  точки изображения необходимо проранжировать в порядке возрастания значения точек  $a_{i+k_{-1}, i+l_{-1}}$  (составляющих окрестность данной точки  $a_{i,j}$ ), а затем заменить значение точки  $a_{i,j}$  ее медианой  $a'_{i,j}$ , которая является  $M$  по счету минимумом среди величин  $a_{i+k_{-1}, i+l_{-1}}$ , где  $M = \Phi(B^2/2)$ ,  $\Phi$  — функция округления величины  $B^2/2$  до ближайшего целого числа.

Анализ метода медианы показывает, что он значительно сложнее метода пространственной регуляризации и его параллельная реализация невозможна. Основной операцией метода медианы является поиск и выделение минимальных значений точек  $a_{i+k_{-1}, i+l_{-1}}$ . Традиционное решение данной задачи связано с попарным сравнением указанных точек. В общем случае, когда значения всех указанных точек различны, максимальное количество операций сравнений, выполняемых для вычисления медианы заданной точки  $a_{i,j}$  в окрестности  $B \times B$ , определим следующим выражением:

$$P = \sum_{q=1}^M (B^2 - q),$$

а общее число операций сравнения при вычислении медиан всех  $n^2$  точек изображения

$$P = n^2 \sum_{q=1}^M (B^2 - q). \quad (1)$$

Учитывая, что  $n^2 = 10^5 - 10^7$ , можно сделать вывод о значительных затратах машинного времени при последовательной реализации метода медианы в ЭВМ. Существенного сокращения времени выполнения операции фильтрации помех методом медианы можно добиться путем реализации процесса параллельного вычисления медианы одновременно для всех точек изображения по принципу обработки информации в нейронных сетях зрительного анализатора. Однако попытки построения моделей нейронных сетей, осуществляющих выделение экстремальных точек и их ранжирование, приводят к сложным многослойным нейроноподобным структурам, что ограничивает их практическое применение при решении задач обработки изображений [7]. Это связано с тем, что решение базовой задачи для метода медианы выделения минимальных значений точек изображения основано на использовании традиционного подхода, в соответствии с которым попарно сравниваются точки изображения. С учетом сказанного, покажем, что, используя специфику задач обработки изображений, можно предложить другой подход к решению задачи выделения экстремальных точек изображения. Действительно, характерной особенностью изображений, представленных матрицей  $|A|$ , является наличие большого числа ( $10^5 - 10^7$ ) точек  $a_{i,j}$  при одновременном, незначительном изменении их значений от 0 до  $2^{k'}$ , причем величина  $k'$  на практике не превышает 8, т. е.  $k' \leq 8$ . Это позволяет отказаться от традиционного подхода определения экстремальных точек изображения путем их попарных сравнений и предложить более простой и эффективный в данном случае метод. Он заключается в одновременном сравнении всех анализируемых точек  $a_{i,j}$  изображения с некоторой величиной, пробегающей от 0 до  $2^{k'}$  с заранее выбранным шагом.

Рассмотрим точку  $a_{i,j}$  изображения и ее окрестность  $a_{i+k-1, j+l-1}$  ( $k, l = 0, 1, 2$ ) размерностью  $3 \times 3$  (см. рис. 1). Введем в рассмотрение также параметр  $z$ , изменяющийся в пределах  $0 - 2^{k'}$  с шагом  $\nabla z = 2^{-k'}$ . Тогда алгоритм вычисления медианы точки  $a_{i,j}$  на основе предложенного метода можно записать в следующем виде:

- 1° Полагаем  $m = 1, z = 0, \nabla z = 2^{-k'}$ . Переход к п. 2°.
- 2° Полагаем  $k = 0$ . Переход к п. 3°.
- 3° Полагаем  $l = 0$ . Переход к п. 4°.
- 4° Вычисляем  $y = \text{sign}(z - a_{i+k-1, j+l-1})$  (2). Переход к п. 5°.
- 5° Если  $y = 1$ , переход к п. 6°. Если  $y = 0$ , переход к п. 8°.
- 6° Если  $m < 5$ , переход к п. 7°. Если  $m = 5$ , переход к п. 12°.
- 7° Полагаем  $m = m + 1$ . Переход к п. 8°.
- 8° Если  $l < 2$ , переход к п. 9°. Если  $l = 2$ , переход к п. 10°.
- 9° Полагаем  $l = l + 1$ . Переход к п. 4°.
- 10° Если  $k < 2$ , переход к п. 11°. Если  $k = 2$ , переход к п. 12°.

11° Полагаем  $k=k+1$ . Переход к п. 4°

12° Вычисляем  $z=z+\nabla z$ . Переход к п. 2°.

13° Вычисляем медиану  $a_{i,j}=z$ . Конец алгоритма.

Применяя полученный алгоритм одновременно ко всем точкам  $a_{i,j}$  изображения, можно за  $2^{k'}$  операций сравнения вычислить медианы всех указанных точек. При этом реализацию процесса параллельного вычисления медианы одновременно для всех точек изображения (на основе предложенного алгоритма) нетрудно осуществить в модели нейронной сети, построенной на базе цифровых нейроноподобных элементов (ЦНЭ) [8, 9]. Как показано в [8, 9], ЦНЭ позволяет воспроизвести основные функциональные свойства нервной клетки и может быть настроен на реализацию математической модели нейрона следующего вида:

$$y_{\text{вых}} = \text{sign}\left(\sum_{j=1}^N x_j \gamma_j - \theta\right), \quad (3)$$

где  $y_{\text{вых}}$  — выходной сигнал нейрона;  $x_j$  — входной сигнал, поступающий на  $j$ -й вход нейрона;  $\gamma_j$  — синаптический вес  $j$ -го входа;  $\theta$  — порог нейрона.

Причем параметры  $\gamma_j$  и  $\theta$  нейрона могут изменяться путем подачи на соответствующие входы ЦНЭ приращений  $\nabla \gamma_j$  и  $\nabla \theta$  [8]. Поставим в соответствие каждой точке  $a_{i,j}$  изображения один ЦНЭ, реализующий математическую модель нейрона (3). На тормозной вход (синаптический вес  $\gamma = -1$ ) каждого такого ЦНЭ подается значение  $a_{i,j}$  соответствующей ему точки изображения, а на входы приращений порога одновременно всех ЦНЭ поступает величина  $\nabla \theta = \nabla z = 2^{-k'}$ , которая изменяет величину их порога  $\theta$  от 0 до  $2^{k'}$  с минимальным шагом  $2^{-k'}$ . В результате совокупность указанных ЦНЭ образует первый слой модели нейронной сети, в котором одновременно для всех точек изображения выполняется выражение (2) из п. 4° предложенного алгоритма, т. е. реализуется сравнение значений одновременно всех точек  $a_{i,j}$  с величиной порога  $\theta$ , пробегающего от 0 до  $2^{k'}$  с шагом  $\nabla \theta = 2^{-k'}$ . Если выходы ЦНЭ первого слоя, которые соответствуют окрестности каждой точки  $a_{i,j}$  изображения, соединить с возбуждающими входами ( $\gamma_j = 1$ ) соответствующих ЦНЭ второго слоя, значения порогов которых равны величине  $\theta = -M$  (для окрестности  $3 \times 3$   $\theta = -5$ ), то получим цифровую нейроноподобную сеть, фрагмент которой представлен на рис. 2. Из рис. 2 видно, что на выходе каждого ЦНЭ второго слоя, соответствующего некоторой точке  $a_{i,j}$  изображения, появится первый единичный сигнал возбуждения только в том случае, когда текущее значение порога  $\theta$  элементов первого слоя, соответствующих окрестности этой точки  $a_{i,j}$  станет равным медиане  $a'_{i,j}$  анализируемой точки  $a_{i,j}$ .

Фиксируя моменты появления первых возбуждающих единичных сигналов на выходах ЦНЭ второго слоя и запоминая полученное в данный момент значение порога  $\theta$  в ЦНЭ первого слоя, можно реализовать процесс параллельного вычисления медиан

всех  $a_{i,j}$  точек изображения. При этом процедура фильтрации помех методом медианы реализуется в цифровой нейроподобной сети, в общем случае (при необходимости обеспечения максимальной точности вычисления медианы) за  $2^{k'}$  операций сравнения, т. е.  $p=2^{k'}$  (4).

Сравнение выражений (1) и (4) показывает, что параллельная реализация процесса фильтрации помех методом медианы осуществляется с помощью модели нейронной сети в  $n^2 \times \sum_{q=1}^M (B^2 - q)/2^{k'}$  (что на практике при  $k' \leq 8$ ,  $M=5$ ,  $B=3$ ,  $n^2 \times 10^5 - 10^7$  составляет  $10^4 - 10^6$ ) раз быстрее, чем его последовательная реализация в ЭВМ.

Таким образом, полученные результаты показывают возможности построения высокоэффективных параллельных систем обработки изображений на базе цифровых нейроподобных сетей, которые обеспечивают повышение быстродействия решения задач фильтрации помех в  $10^4 - 10^6$  раз по сравнению с их последовательной реализацией традиционными средствами вычислительной техники. Рассмотренные в [8] возможности реализации цифровых нейроподобных сетей в микроэлектронном исполнении на основе современной интегральной технологии обеспечивают их практическое построение и использование при решении указанных задач.

**Список литературы:** 1. Александров А. В., Платонов А. И. Алгоритмы и системы восприятия роботов//Представление знаний в человекомашинных и робототехнических системах. М., 1984. Т. 2. С. 139—194. 2. Реальность и прогнозы искусственного интеллекта: Сб. ст.: Пер. с англ./Под ред. В. Л. Стефанюка. М., 1987. 247 с. 3. Соколов Е. Н., Шмелев Л. А. Нейробионика. Организация нейроподобных элементов и систем. М., 1983. 279 с. 4. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. М., 1986. 400 с. 5. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой. М., 1985. 285 с. 6. Хуанг Т. С., Эклунд Д. О. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. М., 1984. 224 с. 7. Позин Н. В. Моделирование нейронных структур. М., 1970. 260 с. 8. Галуев Г. А. Цифровые нейроподобные ансамбли и сети с перестраиваемой структурой/Многопроцес. вычислит. структуры. 1984. Вып. 6(XV). С. 70—72. 9. Каляев А. В., Чернухин Ю. В., Галуев Г. А. Адаптивные цифровые нейроподобные элементы/Изв. СКНЦ ВШ. Техн. науки. 1980. № 2. С. 13—18.

Поступила в редколлегию 04.04.88

УДК 539.2:577.325

В. М. УГРОВЕЦКИЙ

### СТРУКТУРА ХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА ПРЕДБИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Теория химической эволюции была создана в 1924 г. [1]. Однако отдельные вопросы химических процессов, имевших место на добиологической Земле, окончательно не изучены. Например, нет единого мнения о причинах, обеспечивших первоначальный синтез

биологически значимых молекул, в частности ферментов. Рассматривая в качестве предшественников жизни различные фазово-обособленные системы, исследователи приписывали им всевозможные структуры, способные самопроизвольно образовываться в существующих условиях на Земле. Однако последователи Опарина считают, что предшественники настоящего (прошлого) не могут существовать сейчас, поскольку микроструктуры-пробионты, а затем и организмы являются продуктом поэтапных событий во времени [2].

Задача исследования — расширить представление о возможных структурах фазово-обособленных систем добиологического характера, с учетом их образования только в условиях далекого прошлого Земли, и на их основе объяснить общие закономерности самопроизвольного синтеза биополимеров из мономеров без участия ферментов.

*«Своеобразные» фазово-обособленные системы.* Структуры конденсированных систем, например коацерватов, микросфер и т. п., а также различные состояния вещества на молекулярном уровне, в частности, гелеобразные, жидко-кристаллические и другие состоят из термодинамических фаз, каждая из которых представляет собой однородную среду, включающую большое количество молекул. Предположим, что в далеком прошлом имели место молекулярные системы, состоящие не из фаз, а из отдельных молекул, отличающихся между собой по составу и строению. В идеальном случае такие системы должны включать в себя только по одной молекуле каждого типа. Объединение различных молекул в единую фазово-обособленную систему определялось в основном водородным и межмолекулярным взаимодействием [3]. Указанная выше система имела своеобразную структуру, поскольку термодинамические фазы у нее отсутствовали, а ее молекулы не обладали ни ближним, ни дальним порядками [4]. Фазово-обособленные системы с такой структурой назовем своеобразными.

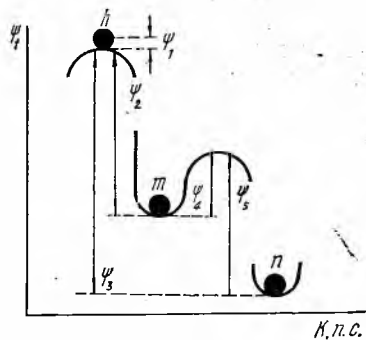
Однако не все органические молекулы способны образовывать рассматриваемые системы. Межмолекулярные и водородные силы сцепления, связывающие молекулы, слабые и могут противостоять энергетическим воздействиям внешней среды лишь в случае их кооперативного взаимодействия. Последние, как известно, возможны между молекулами определенных размеров, которые состоят из необходимых атомов и атомных группировок. Условие существования своеобразных систем заключается в том, чтобы энергия связи каждой молекулы с соответствующей системой превышала воздействия энергетических параметров внешней среды.

Рассматриваемые своеобразные системы могли и могут образовываться на планетах Вселенной при соответствующих условиях. Известно, что такие условия были на добиологической Земле. Во-первых, есть основание полагать, что при первоначальном абиогенном синтезе на добиологической Земле накапливалось не индивидуальное вещество (совокупность идентичных молекул), а смесь органических соединений [5]. Во-вторых, геологические

исследования показывают, что в предполагаемый период возникновения жизни на Земле подземные воды непрерывно перемещали находящиеся в них вещества из мест их образования в места накопления и концентрирования [6]. Под воздействием циклических изменений внешней среды: переохлаждения, выпаривания или других уплотняющих процедур, смеси различных органических молекул могли конденсироваться в своеобразные фазово-обособленные системы. По мере накопления на земной поверхности однотипных органических молекул, образование своеобразных систем прекратилось, поскольку молекулам стало энергетически выгодно объединяться в гомогенные или гетерогенные системы, сохранившиеся и до наших дней почти в неизменном виде.

*Неравновесность своеобразных систем.* Энергия межмолекулярного взаимодействия зависит от физических свойств данных молекул, расстояния  $r$  между ними и складывается из энергии притяжения и отталкивания [3]. Состояние молекулярной системы в целом определяется соотношением внутреннего взаимодействия ее молекул с энергетическими параметрами внешней среды. Во всех конденсированных системах наиболее устойчивое равновесие любой молекулы устанавливается при сближении ее с окружающими молекулами на определенные уравнивающиеся расстояния  $r_0$ , соответствующие минимальному значению потенциальной энергии данного взаимодействия. При сближении всех молекул системы на расстояние  $r_0$  энергия ее структуры незначительна.

Различные формы молекул своеобразной системы не позволяли одновременно сблизиться им во всех взаимодействующих точках на уравнивающиеся расстояния  $r_0$ . Атомы молекул, находящиеся в зоне межмолекулярного взаимодействия на расстоянии  $r \neq r_0$ , создавали неоднородные поля с определенным запасом потенциальной энергии. Такие молекулы находились в неравновесии по отношению к внешней среде. В рассматриваемых системах наблюдались все степени градаций неравновесия, но для удобства исследования разделим их на три вида: неустойчивый, метастабильный, устойчивый (рисунок).



Степени градаций неравновесия (К. п. с. — координата пространства системы в производных единицах)

Из рисунка видно, что каждому виду равновесия соответствует положение шарика, имеющего массу, на определенной поверхности ( $h$  — неустойчивое равновесие,  $m$  — метастабильное,  $n$  — устойчивое равновесие). Разумеется, в своеобразной системе силы, определяющие вид равновесия каждой молекулы, не являются механи-

чески, а вызваны электромагнитными и ядерными взаимодействиями атомов этих молекул.

Важно, что в своеобразных системах структура несимметрична и неоднородна. При рассматриваемом отношении сил межмолекулярного взаимодействия с энергетическими параметрами внешней среды каждая из молекул такой системы представляет собой активный элемент с индивидуальными свойствами, в частности различной их неуровновешенностью межмолекулярного взаимодействия, т. е. структура системы служит активно-неоднородной средой.

При изменении энергетических параметров внешней среды молекулы указанных выше систем, находящихся в неустойчивом равновесии, перестраивались путем перехода в метастабильные или устойчивые. Такой переход молекул сопровождался изменением расстояний в отношении их молекулярного окружения, а значит молекулы, изменяющие свой вид равновесия, перемещались внутри системы. При этом они двигались не хаотически, а по градиенту потенциальных ям, определяемых неоднородностью внутреннего поля. Вместе с тем, молекулы, переходя в более устойчивый вид равновесия, изменяли межмолекулярные связи не только непосредственно с окружающими молекулами, но способствовали нарушению взаимодействий и между ними, что влияло на прежний вид равновесия молекул такого окружения. Таким образом, в рассматриваемой системе переход одних молекул в более устойчивый вид равновесия порождал условия для возникновения новых неустойчивых молекул и т. д.

Следовательно, в своеобразных системах отдельные молекулы находились в неустойчивом виде равновесия в статистических и в динамических ее состояниях, а значит и система в целом неравновесна. Характерно отметить, что под воздействием энергетических параметров внешней среды свободная энергия такой системы не достигала минимума, а перераспределялась внутри ее. Указанная энергия присуща самой структуре. Общую свободную энергию  $\Psi$  своеобразной системы в момент времени  $t$  можно выразить суммой энергий всех молекул, сгруппированных по соответствующим видам равновесия. Если в данный момент времени  $h$  молекул находилось в неустойчивом равновесии,  $m$  — в метастабильном,  $n$  — в устойчивом, то можно записать

$$\Psi_t = \sum_i^h U_{\text{неуст}} + \sum_j^m U_{\text{метаст}} + \sum_k^n U_{\text{уст}}.$$

Наличие свободной энергии в системе способствовало ее лабильности, а, следовательно, под воздействием энергетических параметров внешней среды она приобретала динамичность.

*Необратимость своеобразных систем.* Термодинамические системы состоят из множества молекул с одинаковыми свойствами и для обратимости таких систем достаточно установить только аналогичный вид связей между молекулами, не зависящий от времени их мест в системе. В своеобразных системах каждая

молекула окружена другими, различающимися между собой по физическим свойствам, поэтому виды связей и энергетические характеристики взаимодействия молекул различны. Значит, физические свойства указанных систем зависели не только от состава молекул, но и от относительного месторасположения их в системе. Важной особенностью данных систем является то, что при воздействии на них периодически изменяющихся условий внешней среды, свойственных как для далекого прошлого Земли, так и для настоящего времени (например, суточных, месячных, сезонных и т. д.), их физические свойства изменялись необратимо.

Так, если для перехода какой-либо молекулы из метастабильного равновесия в устойчивое требовалось преодолеть энергетический порог  $\Psi_4$ , то для перехода данной молекулы в исходное равновесие необходимо воздействие с большой энергией, равной  $\Psi_5$ . Аналогичная ситуация наблюдалась и при переходе молекул из неустойчивого равновесия в более устойчивое (метастабильное, устойчивое), поскольку  $\Psi_1 \ll \Psi_2, \Psi_3$  (см. рисунок).

Таким образом, при периодически изменяющихся условиях внешней среды молекулы своеобразной системы переходили из неустойчивых видов равновесия в более устойчивые, порождая новые неравновесия в других молекулах, но при нисхождении энергии данного полупериода в момент времени, например  $t_2$ , соответствующий восхождению энергии  $t_1$ , молекулы не возвращались в исходные состояния.

Если бы градиенты потенциального поля, определяющие траектории перемещения молекул в системе, были направлены только по вертикали, как это показано в плоскости на рисунке, то динамические свойства системы со временем резко бы ухудшились. Но поскольку эти градиенты определялись разнородными молекулами — активными элементами данной системы, то и направления траекторий были разнообразны, свойственные трехмерному пространству. Это обуславливало неограниченную динамичность молекул в рассматриваемых системах.

Итак, под воздействием периодически изменяющихся энергетических параметров внешней среды молекулы своеобразной системы изменяли свое месторасположение направленно и необратимо. Рассматриваемое перемещение молекул в системе назовем их релаксацией. Важно отметить, что если для формирования своеобразных систем требовалось, чтобы молекулы не были слишком малы, то для активной релаксации таких молекул они не должны быть очень большими. При оптимальном подборе размеров и физико-химических свойств молекул с изменяющимися параметрами внешней среды, молекулы системы могли определенное время релаксировать.

*Катализ в своеобразных системах.* Для осуществления элементарного акта химической реакции необходимо выполнение нескольких условий [7]. Одно из них — преодоление энергетического барьера (энергии активации), вызванного отталкивающими силами положительно заряженных атомных ядер реагирующих

молекул. В одних случаях такой барьер преодолевается внешними воздействиями, например увеличением кинетической энергии данных молекул путем повышения температуры системы. Этот метод часто применяется в химической промышленности. В других — он понижается катализом, в котором при взаимодействии субстрата с катализатором конфигурация электронного облака реагирующей молекулы изменяется так, что облегчается ее вступление в химическую реакцию. По существу здесь используется внутренняя энергия взаимодействия атомов. Очень высокой каталитической активностью обладает ферментативный катализ [8], где катализаторами служат ферменты, которые получили широкое распространение в живой природе. В таком катализе, в принципе, используются все явления и процессы обычного катализа, но благодаря специфическим структурам ферментов они ускоряются и упорядочиваются оптимальным образом.

Механизмы ферментативного катализа в общих чертах выяснены [9], обратим внимание только на отдельные их стороны, представляющие интерес и для своеобразных систем. В процессе образования активированного комплекса между специфическим ферментом и субстратом одновременно гарантируется относительное расположение их активных групп на необходимое расстояние и определенной стороной, в результате чего реализуются эффект сближения и ориентации, которые ускоряют химические реакции в  $10^7$  и более раз [10]. Вместе с тем структурные особенности белка позволяют сосредоточить в одной его области несколько различных активных групп, одновременно взаимодействующих как между собой, так и с субстратом, что вызывает эффект полифункционального катализа, который понижает энергетический барьер молекулы так, что химическая реакция ускоряется в  $10^3$  и более раз [10]. Характерно, что с момента образования указанного выше комплекса он может изменять свою структуру определенным образом, обеспечивая поэтапную комплементарность фермента с субстратом, в результате чего, на каждом этапе создаются условия, максимально благоприятствующие их реакции. Данная регуляция обеспечивается за счет взаимодействия активных групп, образующих активный центр фермента, с функциональными группами ближнего и дальнего его окружения.

В термохимических системах без присутствия высокомолекулярных ферментов могут реализовываться только отдельные рассмотренные эффекты, понижающие энергетический барьер молекул и то частично. Так, эффект сближения частично реализуется при определенной концентрации реагирующих веществ, однако вероятность оптимальной ориентации функциональных групп молекул (эффект ориентации) в обычных системах низка для двух молекул и практически равна нулю для трех и более. Эффект полифункционального катализа в растворах невозможен. Однако замечено, что на каталитическую активность молекул в кристаллических системах значительно влияет их ближнее окружение, когда оно состоит из различных атомов, т. е. когда имеются нару-

шения химического состава в кристаллических решетках системы [11]. В термохимических системах механизма поэтапной комплементарности реагирующих молекул не наблюдается. Так, если жидкие системы не обладают определенной надмолекулярной структурой, в результате чего вероятность скопления различных молекул в нужном порядке равна нулю, то молекулы более конденсированных систем, например аморфных, кристаллических и т. д., в достаточной мере не подвижны по структуре.

Промежуточные свойства по ферментации между термохимическими системами и ферментами присущи своеобразным системам, поскольку они обладали структурными предпосылками для проявления эффектов, имеющих место в ферментативном катализе. Например, если в процессе релаксации таких систем одни молекулы находились в окружении других с нужными активными группами, ориентированными определенным образом, и на необходимых расстояниях как между собой, так и с релаксируемыми молекулами, то в таком случае возможно одновременное проявление эффекта ориентации, сближения и полифункционального катализа. В своеобразных системах нет строгого разграничения на релаксируемые и нерелаксируемые молекулы. Если в данный момент времени одни молекулы релаксировали, а другие — выполняли функцию окружения, то в следующий момент времени они могли меняться своим назначением, а следовательно, создавались условия для реализации молекулярных процессов, аналогичных механизму поэтапной комплементарности фермента с субстратом.

Таким образом, в процессе релаксации своеобразных систем образовывались как бы перестраивающиеся ферменты с временной каталитической активностью. С одной стороны, такой катализ мог бы многократно активировать молекулы системы различной интенсивностью не требуя от них специфичности. С другой, — по причине изменяющихся активных центров, в данной системе химические реакции проходили необратимо.

Релаксация молекул в своеобразных системах не целесообразна, как это наблюдается при изменении структуры фермента, но она и не хаотическая. По рассмотренным ранее причинам молекулы в таких системах перемещались необратимо и направлено по определенным траекториям, характерным для каждой молекулы конкретной системы. Это создало условия для прогрессивной эволюции каталитического механизма в системах путем естественного отбора самих систем.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы. Кроме молекулярных систем, отмеченных в природе и полученных в лабораторных условиях, в далеком прошлом на Земле могли существовать фазово-обособленные системы со своеобразными структурными построениями. Они состояли не из термодинамических фаз, а из отдельных молекул различного состава и строения. Под воздействием энергетических параметров внешней среды молекулы своеобразных систем релаксировали направленно и необ-

ратимо. Такая релаксация способствовала образованию временных каталитических центров в системе, по эффективности аналогичных ферментам, т. е. создавались условия, соответствующие предбиологическому химическому реактору, где без экстремальных воздействий на систему и без участия существующих высокомолекулярных ферментов, происходил синтез полимеров из мономеров. В таком реакторе для преодоления энергетического барьера реагирующих молекул использовалась энергия межмолекулярного взаимодействия окружающих молекул, т. е. энергия атомов. Кроме того, каталитические механизмы своеобразных систем обладали потенциальными возможностями к эволюции посредством естественного отбора самих систем. Поэтому можно предположить, что углубленное исследование своеобразных систем будет способствовать не только дальнейшему выявлению уникальных механизмов химического синтеза в живой природе, но и решению проблемы происхождения жизни в рамках теории Опарина.

Список литературы: 1. *Опарин А. И.* Происхождение жизни. М., 1924. 70 с. 2. *Гладилин К. Л.* Проблема происхождения жизни//Арена биологической эволюции. М., 1986. С. 3—16. 3. *Уэбб Л.* Ингибиторы ферментов в метаболизме. М., 1966. С. 205—241. 4. *Китайгородский А. И.* Порядок и беспорядок в мире атомов. М., 1984. 174 с. 5. *Ордо Дж.* Этапы и механизмы предбиологического органического синтеза//Происхождение предбиологических систем. М., 1956. С. 144—169. 6. *Руттен М.* Происхождение жизни. М., 1973. 411 с. 7. *Брей Дж., Уайт К.* Кинетика и термодинамика биохимических процессов. М., 1959. 380 с. 8. *Кретович В. Л.* Введение в энзимологию. М., 1974. 146 с. 9. *Браунштейн А. Е., Корпейский М. Я.* Структурные предпосылки специфичности и эффективности ферментативного катализа//Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д. И. Менделеева. 1971. 16. № 4. С. 362—369. 10. *Клессов А. А.* Химический энциклопедический словарь. М., 1983. С. 617. 11. *Волькенштейн Ф. Ф.* Электронная теория катализа на полупроводниках. М., 1960. 197 с.

Поступила в редколлегию 01.12.88

УДК 007.52:519.816

Б. М. ЕГОРОВ, д-р техн. наук, В. А. МИЩЕНКО, д-р техн. наук,  
А. А. ПРИХОЖИЙ, канд. техн. наук

## БАЗА ЗНАНИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СБИС

С целью автоматизации проектирования часто используют системы, базирующиеся на сборе, формализации и манипулировании знаниями специалистов об объектах проектирования. Эти системы будем называть экспертными системами проектирования. Остановимся на проблеме построения экспертной системы проектирования СБИС [1].

При автоматизации проектирования СБИС в ряде случаев не удается построить точную математическую модель объекта, явления или процесса, позволяющую решать практические задачи проектирования за реальное время. В этом случае накапливаются знания о решении этих задач проектировщиками. Знания система-

тизируются, формализуются и загружаются в базу знаний. После этого проектные задачи способна решать формальная система, имитирующая рассуждения проектировщиков и использующая базу знаний [2].

*Представление знаний.* Для представления знаний используются гибкие не алгоритмические модели. Модель представления знаний определяет способ формализации знаний и во многом — способ манипулирования знаниями в процессе решения задач в формальной системе. Модель представления знаний является главной характеристикой экспертной системы.

Формализацию проектировочных знаний будем осуществлять в рамках предикатной логики. При этом знания делятся на факты и закономерности. Факты об объекте и процессе проектирования, о его структуре, характеристиках, требованиях к нему опишем предикатами  $A(x_1, \dots, x_n)$ , где  $x_i, i=1, \dots, n$  — либо объектная константа, либо переменная, либо функция.

Предикаты рассматриваются в данном случае как отношения над элементами объектной области. Благодаря тому, что аргументами предикатов могут быть суперпозиции функций, допускается описание структурированных объектов.

Закономерности построения объекта, закономерности процесса проектирования представляются импликациями  $A(x) \leftarrow B(x)$ , где  $\leftarrow$  — импликация;  $B(x)$  — логическое выражение, являющееся посылкой импликации;  $A(x)$  — предикат, представляющий собой следствие импликации;  $x$  — вектор переменных, объектных констант функций, входящих в импликацию. Логическое выражение  $B(x)$  имеет вид конъюнкции предикатов

$$B(x) = B_1(x) \text{ and } \dots \text{ and } B_n(x).$$

Считается, что импликация истинна при любых значениях переменных из заданной области, входящих в импликацию. Импликация целесообразно интерпретировать как продукции.

При построении экспертной системы проектирования используют закономерности, утверждения о которых могут быть сделаны лишь с определенной степенью уверенности. Степень уверенности выражается вероятностью  $P(A)$  истинности факта  $A$  и условными вероятностями  $P(A|B)$  и  $P(\bar{A}|B)$  истинности выражения  $A$  при условии истинности и ложности выражения  $B$ .

Для выражения степени уверенности используется также теория нечетных множеств. В этом случае каждому выражению ставится в соответствие функция принадлежности этого выражения к истинным или ложным.

Предикатная логика позволяет учесть особенности проектной области, ее понятия, закономерности. В рамках расширенной предикатной логики можно отражать неопределенности в проектных знаниях. Использование унифицированных схем представления знаний позволяет строить интегрированные системы проектирования, основанные на знаниях.

Исчисление предикатов является моделью, на которой может базироваться разработка теории проектирования. Эта модель позволяет описывать различные отношения между объектами проектирования и их элементами, обеспечивает решение задач синтеза и анализа объектов проектирования. Задачи решаются путем четкого и нечеткого логического вывода.

*Решение задач проектирования СБИС путем логического вывода.* Логический вывод применяется для решения тех задач проектирования СБИС, для которых возможно построение формальной системы знаний о проектируемом объекте. Процесс проектирования совпадает с процессом логического вывода.

Например, рассмотрим задачу построения сокращенной ДНФ булевой функции, используемой для построения кратчайшей ДНФ. Булеву функцию в ДНФ представим троичной матрицей, являющейся списком строк, каждая из которых является списком элементов из множества  $\{0, 1, -\}$ . Список элементов определим рекурсивной функцией.  $(x, y)$  «точка», в которой  $x$  — элемент,  $y$  — список элементов.

Пустой список обозначим через  $\Delta$ . Список строк определим функцией;  $(e, f)$  «точка с запятой», где  $e$  — строка,  $f$  — список строк или  $\Delta$ .

Функцию  $(x, y)$  будем записывать в виде  $x.y$ , а функцию  $(e, f)$  — в виде  $e; f$ . Так для булевой функции  $\overline{x_1}x_2x_3 \vee x_1x_2x_3 \vee x_2x_3$  троичная матрица

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ - & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{представляется в виде } \begin{matrix} 0. 0. 1. \Delta; \\ 1. 0. 1. \Delta; \\ -. 0. 0. \Delta; \Delta. \end{matrix}$$

Символом  $x$  обозначим переменную, значениями которой являются элементы, символами  $a, c, e$  — переменные, значениями которых являются строки, символами  $b, d, f, g, h, q$  — переменные, значениями которых являются матрицы.

Исследуя значения о кратчайшей ДНФ, записываем следующую упорядоченную систему аксиом:

- 1)  $\beta(\Delta, \Delta)$ ;
- 2)  $\beta(d, f) \leftarrow \mu(q, f) \text{ and } \sigma(h, q) \text{ and } \nu(q, f, h) \text{ and } \beta(b, h) \text{ and } \chi(d, g, b)$ ;
- 3)  $\mu(\Delta, e; \Delta)$ ;
- 4)  $\mu(h, e; f) \leftarrow \tau(g, e, f) \text{ and } \mu(d, f) \text{ and } \chi(h, g, d)$ ;
- 5)  $\tau(\Delta, e, \Delta)$ ;
- 6)  $\tau(a; g, e, c; f) \leftarrow \delta(a, e, c) \text{ and } \tau(g, e, f)$ ;
- 7)  $\tau(g, e, c; f) \leftarrow \tau(g, e, f)$ ;
- 8)  $\delta(-. e, 1. e, 0. e)$ ;
- 9)  $\delta(-. e, 0. e, 1. e)$ ;
- 10)  $\delta(x, a, x. e, x. c) \leftarrow \delta(a, e, c)$ ;

- 11)  $\sigma(\Delta, \Delta)$ ;
- 12)  $\sigma(h, a; q) \leftarrow \upsilon(a, q)$  and  $\sigma(h, q)$ ;
- 13)  $\sigma(a; h, a; q) \leftarrow \sigma(h, q)$ ;
- 14)  $\upsilon(a, a; q)$ ;
- 15)  $\upsilon(a, c; q) \leftarrow \circ(a, q)$ ;
- 16)  $\vee(\Delta, \Delta, h)$ ;
- 17)  $\vee(g, c; f, h) \leftarrow \eta(c, h)$  and  $\vee(g, f, h)$ ;
- 18)  $\vee(c; g, c; f, h) \leftarrow \vee(g, f, h)$ ;
- 19)  $\eta(c, e; h) \leftarrow \varepsilon(c, e)$ ;
- 20)  $\eta(c, e; h) \leftarrow \eta(c, h)$ ;
- 21)  $\varepsilon(\Delta, \Delta)$ ;
- 22)  $\varepsilon(x. c, \text{---} e) \leftarrow \varepsilon(c, e)$ ;
- 23)  $\varepsilon(x. c, x. e) \leftarrow \varepsilon(c, e)$ ;
- 24)  $\chi(h, \Delta, b)$ ;
- 25)  $\chi(e; d, e; g, b) \leftarrow \chi(g, d, b)$ .

**Теорема.** Предикат  $\beta(d, f)$ , удовлетворяющий системе аксиом (1—25), истинен, если  $d$  является сокращенной ДНФ булевой функции  $f$ .

Из теоремы следует, что приведенная система аксиом может служить основой для решения задачи построения сокращенной ДНФ путем логического вывода [2]. Задача формулируется в виде: по известной  $f$  найти такое  $d$ , что  $\beta(d, f)$ . Для  $f=0.0.1.\Delta$ ;  $1.0.1.\Delta$ ;  $\text{---}0.0.\Delta$ ;  $\Delta$  результатом логического вывода является  $\text{---}0.\text{---}.\Delta$ ;  $\Delta$ . Аналогичным образом можно описать знания о других задачах проектирования СБИС.

*Модель базы знаний.* База знаний обеспечивает передачу функций накопления и хранения знаний, а также функции решения задач, поставленных на знаниях, вычислительной машине. Модель базы знаний строится исходя из модели знаний.

Модель базы знаний включает следующие конструкции.

1. Словарь. Это упорядоченная последовательность понятий

$$1. \omega_1, 2. \omega_2, \dots, i \cdot \omega_i, \dots, h \cdot \omega_h,$$

где  $i=1 \dots h$  — номер слова;  $\omega_i$  — слово понятия.

2. Числовая константа  $k$ . Различаются целые числа и вещественные числа.

3. Переменная, принимающая значения понятий и констант из заданного множества. Переменная записывается в виде  $\%v$ , где  $v$  — текст.

4. Предикат  $p(a_1 \dots a_m)$ , рассматриваемый как двузначная функция и трактуемый как отношение. Синтаксис предиката имеет вид  $c_1 a_1 c_2 a_2 \dots a_m c_{m+1}$ , где  $a_i$  —  $i$  аргумент предиката;  $c_i$  —  $i$  разделитель аргументов.

5. Функция  $f(a_1 \dots a_m)$ , являющаяся рекурсивной и имеющая синтаксис такой же, как и синтаксис предиката.

6. Таблица отношения, задающая значение предиката и имеющая вид

$$T_r = \left[ \begin{array}{c|ccc} b_1 & a_{11} & \dots & a_{1m} \\ b_2 & a_{21} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_l & a_{l1} & \dots & a_{lm} \end{array} \right],$$

где  $T_r$  — имя таблицы;  $b_1 \dots b_l$  — веса истинности значений предиката, соответствующих строкам таблицы;  $a_{11} \dots a_{lm}$  — аргументы предиката, которыми могут быть коды понятий, числовые константы, переменные, имена таблиц функций.

7. Модуль отношения, включающий синтаксическое определение соответствующего предиката и набор таблиц отношения:

$$M_r = \{C_r, T_{r1}, \dots, T_{rn}\}.$$

8. Таблица функций, задающая значение рекурсивной функции и имеющая вид

$$T_f = \begin{array}{c} 1 \\ \vdots \\ l \end{array} \left[ \begin{array}{ccc} a_{11} & \dots & a_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{l1} & \dots & a_{lm} \end{array} \right],$$

где  $T_f$  — имя таблицы;  $a_{11} \dots a_{lm}$  — аргументы функции, которыми могут быть коды понятий, числовые константы, переменные, имена таблиц других функций, номера строк данной таблицы.

9. Модуль функции, включающий синтаксическое определение функции и набор таблиц функции:

$$M_f = \{C_f, T_{f1}, \dots, T_{fn}\}.$$

10. Импликация, состоящая из посылки и следствия. Посылкой является конъюнкция предикатов, следствием — предикат. Для каждой посылки указывается набор модулей, используемых для разрешения этой посылки. Импликация представляется в виде

$$M_r \cdot T_r \leftarrow M_{r1} \cdot T_{r1} = S_1 \text{ and } \dots \text{ and } M_{rl} \cdot T_{rl} = S_l,$$

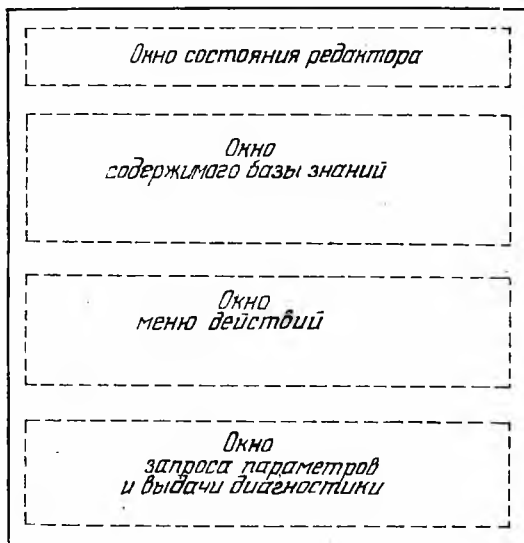
где  $M_r, T_r$  — модуль и таблица отношения следствия;  $M_{ri}, T_{ri}, S_i$  при  $i=1 \dots l$  — модуль и таблица посылки, а также набор модулей, используемых для ее разрешения.

11. Модуль импликаций, включающий импликацию, имеющие одно и то же следствие:  $M_i = \{I_1, \dots, I_v\}$ , где  $I_j$  при  $j=1 \dots v$  — импликация.

12. Набор модулей  $S = \{S_1 \dots S_b\}$ , где  $S_i$  при  $i=1 \dots b$  — ссылка на  $i$  модуль. Для модуля отношения ссылка включает имя модуля и имя таблицы:  $S = M_r \cdot T_r$ . Для модуля импликаций ссылкой является имя модуля  $M_i$ , для набора модулей — имя набора  $S_j$ . Наборы модулей могут строиться иерархически.

13. База знаний  $B = (W, \{M_{r1} \dots M_{rm1}\}, \{M_{f1} \dots M_{fm2}\}, \{M_{i1} \dots M_{im3}\}, \{S_1 \dots S_{m4}\})$ , включающая словарь, множество модулей отношений, множество модулей функций, множество модулей импликаций, множество наборов модулей.

*Редактор базы знаний.* Редактор базы знаний предназначен для настройки базы знаний на объектную область, построения словаря объектной области, определения предикатов и функций, используемых в ней, загрузки закономерностей и фактов в базу



Структура кадра редактора базы знаний

знаний, корректировки базы знаний. База знаний рассматривается как некоторая структура, а основные функции редактора состоят в создании и изменении этой структуры в диалоговом режиме. Таким образом, редактор является структурным, диалоговым.

База знаний состоит из отдельных типовых частей, между которыми установлены определенные связи. Каждой типовой части поставлен в соответствие кадр экрана редактора, структура которого представлена на рисунке. Каждый кадр отражает содержимое соответствующей части базы знаний и указывает на возможные действия по ее редактированию. Как правило, эти действия сводятся к добавлению, изменению или удалению некоторого элемента из общей структуры базы знаний.

Редактирование базы знаний протекает в процессе работы с кадрами и в процессе перехода от одного кадра к другому. Переходы между кадрами описываются моделью конечного автомата. Направление перехода зависит от текущего состояния редактора и действия, выполняемого им.

Кадры делятся на окна, отражающие состояние редактора, содержимое рассматриваемой части базы знаний, возможные действия по редактированию, диагностическую информацию. В специальном окне осуществляется запрос и ввод информации от пользователя.

Язык редактора базы знаний включает 12 кадров: начальный; набора модулей; списка наборов модулей; модуля импликаций; импликаций; списка модулей импликаций; модуля отношения или функции; списка модулей отношений или функций; таблицы модуля отношения или функции; строки таблицы модуля отношения или функции; списка таблиц модуля отношения или функции; словаря понятий.

*Реализация.* С целью экспериментальной проверки работоспособности описанной модели базы знаний и средств ее редактирования, а также с целью создания в конечном счете работоспособной системы написаны экспериментальные программы построения и редактирования базы знаний, решения задач путем логического вывода. Программы написаны на языке Паскаль на ЭВМ СМ 1407, СМ 1420.

Модель базы знаний представлена десятью файлами прямого доступа. На программную реализацию редактора базы знаний наложили отпечаток два основных обстоятельства. С одной стороны, редактор — это диалоговое средство, интерпретирующее диалоговый язык, с другой, — это средство управления базой знаний, позволяющее загружать в базу знаний закономерности и факты и модифицировать их. Отсюда, программа редактора является комбинацией диалоговых подпрограмм и подпрограмм управления базой знаний. Имеется также программа развертывания базы знаний.

Программа редактора построена по модульному принципу. Она состоит из подпрограмм обслуживания кадров и управляющей программы. Подпрограммы обслуживания кадров отображают состояние редактора, содержимое базы знаний и меню действий на экране дисплея, вводят указываемые пользователем действия и выполняют их, запрашивая необходимую информацию и изменяя содержимое базы знаний. Управляющая программа реализует конечный автомат и переключает кадры по задаваемому этим автоматом закону:

В основе программы решения логических задач лежит модель абстрактной машины логического вывода [3]. В этой модели знания, задача и логический вывод представляются размеченными деревьями, функциональная часть машины описывается рекурсивными функциями над деревьями. Программа рассматривает знания и задачу как исходные данные и строит путем редуцирования задачи заверченный логический вывод, из которого извлекается искомое решение.

Список литературы: 1. *Логическое проектирование БИС/Под ред. В. А. Мищенко. М., 1984. 312 с.* 2. *Прихожий А. А. Алгоритмы и модели построения экспертных систем. Минск, 1987. 54 с. (Препринт № 23. Ин-т техн. кибернетики АН БССР. № 3. Прихожий А. А. Абстрактная диалоговая машина логического вывода//ИНФОРМАТИКА-87. Ереван, 1987. С. 187—188.*

Поступила в редколлегию 25.07.88

УДК 52.007.52—621.86

В. А. ИЛЬИН

### МЕТОД УСТОЙЧИВЫХ ТОЧЕК В РАСПОЗНАВАНИИ И ОПРЕДЕЛЕНИИ ОРИЕНТАЦИИ СЕРИИ РАЗНОТИПНЫХ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Для одновременного решения задач распознавания и определения ориентации плоских объектов \* воспользуемся признаками, инвариантными вращению и сдвигу плоскости

$$\psi(\rho^2(x_1, u), \rho^2(x_2, u), \dots, \rho^2(x_k, u)), \quad (1)$$

где  $x_i = (x_i^{(1)}, x_i^{(2)})$   $i=1, \dots, k$  — точки контура объекта,  $u \in W$  — окружность радиуса  $r$  с центром в центре тяжести объекта  $u_0 = (u_0^{(1)}, u_0^{(2)})$ ;  $\rho^2(x, u)$  — квадрат евклидова расстояния на плоскости.

Для распознавания и определения ориентации объекта вводится характерная точка  $u^* \in W$ , вычисляемая для каждого объекта на основе значений признаков вида (1). Вектор  $u^* - u_0$  определяет ориентацию объекта, а значение признаков — тип объекта \*.

При фиксированном радиусе  $r$  положение точек  $u$  на окружности  $W$  определяется углом наклона  $\varphi$  радиус-вектора  $u - u_0$  к одной из осей системы координат, связанной с изображением. Поэтому признаки вида (1) кратко обозначаем  $\Psi(A, \varphi)$ , где  $A$  — объект,  $\varphi$  — угол, определяющий положение точки  $u$  на окружности.

Через  $g_\alpha(A)$  обозначаем преобразование вращения объекта  $A$  на угол  $\alpha$  вокруг центра тяжести объекта. Для любого признака вида (1) при фиксированном  $\varphi$  значения  $\Psi(A, \varphi)$  и  $\Psi(g_\alpha(A), \varphi + \alpha)$  теоретически совпадают, но практически отличаются из-за влияния дискретности изображения и шумов фотоприемного устройства. Задача распознавания и определения ориентации объектов в рассматриваемом подходе состоит в том, чтобы для каждого заданного набора объектов уметь находить такую совокупность признаков вида (1), которая бы давала возможность надежно распознавать и определять ориентацию объектов в условиях искажений, вызываемых влиянием дискретности и шумов.

\* Ильин В. А., Харламова Н. А. // Материалы VI Всесоюз. шк.-семинара. Томск, 1987. Ч. 1. С. 155—164.

Пусть задана совокупность признаков  $\Psi_q(A, \varphi)$ ,  $q=1, \dots, R$  вида (1). Предполагаем, что известны величины  $\varepsilon_q$ ,  $q=1, \dots, R$ , задающие пределы возможных колебаний значений признаков в зависимости от угла разворота объекта  $A$ , т. е.

$$\psi_q(A, \varphi) - \varepsilon_q \leq \psi_q(g_\alpha(A), \varphi + \alpha) \leq \psi_q(A, \varphi) + \varepsilon_q, \\ \alpha, \varphi \in [0, 2\pi], q = 1, \dots, R. \quad (2)$$

Несколько ниже будет описан способ практического вычисления оценок величин  $\varepsilon_q$ ,  $q=1, \dots, R$ .

Пусть заданы число  $\beta > 0$ , характеризующее требуемую точность определения ориентации объектов и некоторое положение объекта  $A$ , которое будем называть начальным или эталонным.

**Определение 1.** Набор признаков  $\Psi_q(A, \varphi)$ ,  $q=1, \dots, R$  называется  $(\varepsilon, \beta)$ -устойчивым для объекта  $A$ , если существует точка  $\varphi^* \in [0, 2\pi]$ , называемая точкой устойчивости, что множество  $T^{(R)}(A, \varphi^*)$  вида

$$T^{(R)}(A, \varphi^*) = \{y = (y_1, \dots, y_R) : \psi_q(A, \varphi^*) - \\ - \varepsilon_q \leq y_q \leq \psi_q(A, \varphi^*) + \varepsilon_q\} \quad q = 1, \dots, R \quad (3)$$

не пересекается для всех  $\varphi \in (\varphi^* - \beta; \varphi^* + \beta)$  со множествами  $T^{(R)}(A, \varphi)$  вида

$$T^{(R)}(A, \varphi) = \{y = (y_1, \dots, y_R) : \psi_q(A, \varphi) - \\ - \varepsilon_q \leq y_q \leq \psi_q(A, \varphi) + \varepsilon_q\} \quad q = 1, \dots, R. \quad (4)$$

Пусть задана совокупность плоских объектов  $A_j$ ,  $j=1, \dots, M$ . Каждому объекту сопоставляется множество  $B^*(A_j)$  тех точек  $\varphi$  из промежутка  $[0, 2\pi]$ , среди которых ищется устойчивая для объекта  $A_j$  точка  $\varphi_j^*$ . Множества  $B^*(A_j)$ ,  $j=1, \dots, M$  формируются исходя из конкретных требований на процедуру распознавания и определения ориентации. В частности,  $B^*(A_j)$  может совпадать с промежутком  $[0, 2\pi]$ . Ниже будет указан один из возможных способов задания этих множеств.

**Определение 2.** Набор признаков  $\Psi_q(A, \varphi)$ ,  $q=1, \dots, R$  называется  $(\varepsilon, \beta)$ -достаточным для решения задачи распознавания и определения ориентации объектов совокупности  $\{A_j, j=1, \dots, M\}$ , если набор признаков  $(\varepsilon, \beta)$ -устойчив для каждого объекта и выполняются соотношения

$$T^{(R)}(A_j, \varphi_j^*) \cap G^{(R)}(A_n) = \emptyset, \quad j, n = 1, \dots, M, \quad j \neq n, \quad (5)$$

где 
$$G^{(R)}(A_n) = \bigcup_{\varphi \in B^*} T^{(R)}(A_n, \varphi), \quad B^* = \bigcup_{j=1}^M B^*(A_j).$$

Если набор признаков, обладающий  $(\varepsilon, \beta)$ -достаточным свойством, найден, то он дает возможность однозначно распознавать объекты и определять их ориентацию с точностью  $\beta$ . Для этого на основе значений признаков составляется следующая таблица.

Границы колебаний признака

$\psi/A$	$A_1$		$A_2$		...	$A_m$	
1	$\psi_1 - \varepsilon_1^{(1)}$	$\psi_1 + \varepsilon_1^{(1)}$	$\psi_1 - \varepsilon_1^{(2)}$	$\psi_1 + \varepsilon_1^{(2)}$	...	$\psi_1 - \varepsilon_1^{(M)}$	$\psi_1 + \varepsilon_1^{(M)}$
2	$\psi_2 - \varepsilon_1^{(2)}$	$\psi_2 + \varepsilon_2^{(1)}$	$\psi_2 - \varepsilon_2^{(2)}$	$\psi_2 + \varepsilon_2^{(2)}$	...	$\psi_2 - \varepsilon_2^{(M)}$	$\psi_2 + \varepsilon_2^{(M)}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$			
$P =$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...	...	...
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$			
R	$\psi_R - \varepsilon_R^{(1)}$	$\psi_R + \varepsilon_R^{(1)}$	$\psi_R - \varepsilon_R^{(2)}$	$\psi_R + \varepsilon_R^{(2)}$	...	$\psi_R - \varepsilon_R^{(M)}$	$\psi_R + \varepsilon_R^{(M)}$
$\psi^*$	$\psi_1^*$		$\psi_2^*$		...		$\psi_M^*$

Величины  $\psi_q - \varepsilon_q^j$  и  $\psi_q + \varepsilon_q^j$ ,  $q=1, \dots, R$ ;  $j=1, \dots, M$  в таблице  $P$  задают нижнюю и верхнюю границы колебаний признака  $\psi_q$  для объекта  $A_j$ . Последняя строка задает точки устойчивости  $\psi_j^*$ ,  $j=1, \dots, M$  для объектов, находящихся в некотором начальном (эталонном) положении, выбираемом произвольно.

Пусть система технического зрения воспринимает некоторый объект  $A$ . Рассматривается последовательность углов  $\alpha_i$ ,  $\alpha_i \in B^*$ ,  $i=1, \dots, N$ , которая является дискретизацией множества  $B^*$ . Предполагается, что каждая точка последовательности  $\alpha_i$ ,  $i=1, \dots, N$  удовлетворяет одному из двух условий:

- 1) для  $\alpha_i$  существует  $\alpha_k \in B^*$ ,  $i \neq k$ , что  $|\alpha_i - \alpha_k| \leq \beta$ ;
- 2)  $D_i \cap B^* = \alpha_i$ , где  $D_i$  промежуток вида  $[\alpha_i - \beta; \alpha_i + \beta]$ .

Процедура распознавания и определения ориентации работает последовательно следующим образом.

*Шаг 1.* Для  $i=1$  подсчитываются значения  $\Psi_1(A, \alpha_i)$ . Проверяется  $M$  неравенств вида

$$\psi_1 - \varepsilon_1^{(j)} \leq \Psi_1(A, \alpha_i) \leq \psi_1 + \varepsilon_1^{(j)}, \quad j=1, \dots, M, \quad (6)$$

где левые и правые члены неравенств берутся из первой строки таблицы  $P$ . Если  $\Psi_1(A, \alpha_i)$  не удовлетворяет ни одному из неравенств (6), то осуществляется переход к шагу 2, если удовлетворяет хотя бы одному неравенству, то — к шагу 3.

*Шаг 2.* Производится подсчет значения  $\Psi_1(A, \alpha_{i+1})$  и аналогичная шагу 1 проверка неравенств вида (6) с последующим переходом на основе тех же самых условий либо к повторению шага 2 с увеличением  $i$ , либо к шагу 3.

*Шаг 3.* Пусть для величины  $\Psi_1(A, \alpha_i)$  удовлетворяются некоторые неравенства (6). Через  $I_1$  обозначается множество номеров

этих неравенств. Вычисляется значение  $\Psi_2(A, \alpha_i)$ , проверяются неравенства

$$\psi_2 - \varepsilon_2^{(j)} \leq \psi_2(A, \alpha_i) \leq \psi_2 + \varepsilon_2^{(j)}, \quad j \in I_1, \quad (7)$$

где левые и правые члены в (7) берутся из второй строки таблицы.

Если  $\Psi_2(A, \alpha_i)$  не удовлетворяет всем неравенствам, то производится переход к шагу 2, иначе формируется множество  $I_2$  тех номеров из  $I_1$ , для которых неравенство вида (7) выполняется. Вычисляется значение  $\Psi_3(A, \alpha_i)$  и аналогично формируется множество  $I_3 \subset I_2$  и т. д. При продолжении этого процесса могут возникнуть две ситуации: а) для данного  $\alpha_i$  на некотором этапе  $q \leq R$  множество  $I_q$  оказывается пустым. В этом случае осуществляется переход к шагу 2; б) для данного  $\alpha_i$  все множества  $I_q$ ,  $q=1, \dots, R$  не пусты, и тогда из определения 2 следует, что множество  $I_R$  содержит один элемент  $j_R$ , который и определяет тип объекта (утверждение 1). Угол  $\alpha_i$  определяет ориентацию объекта. Объект  $A_{j_R}$  развернут относительно начального положения, определяемого углом  $\varphi_{j_R}^*$ , на угол  $\alpha_i - \varphi_{j_R}^*$ .

*Утверждение 1.* Если множество  $I_R$  не пусто, то оно содержит один элемент  $j_R$ . Разворот объекта  $A_{j_R}$  относительно начального положения определяется углом  $\alpha_i - \varphi_{j_R}^*$  с точностью  $\beta$ .

*Доказательство.* Если  $I_R$  не пусто, то по построению множества  $I_R$  вектор  $y = (\psi_1(A, \alpha_i), \psi_2(A, \alpha_i), \dots, \psi_R(A, \alpha_i))$  удовлетворяет неравенствам

$$\psi_q - \varepsilon_q^{(j)} \leq \psi_q(A, \alpha_i) \leq \psi_q + \varepsilon_q^{(j)}, \quad q=1, \dots, R; \quad j \in I_R. \quad (8)$$

Неравенства (8) задают множества  $T^{(R)}(A_j, \varphi_j^*)$ ,  $j \in I_R$  вида (3). Если  $I_R$  содержит более одного элемента, то вектор  $y$  принадлежит одновременно нескольким множествам  $T^{(R)}(A_j, \varphi_j^*)$ ,  $j \in I_R$ . Но любые два множества  $T^{(R)}(A_j, \varphi_j^*)$  и  $T^{(R)}(A_n, \varphi_n^*)$  попарно не пересекаются, что следует из (5) и определения  $G^{(R)}(A_n)$ . Следовательно, вектор  $y$  принадлежит только какому-то одному множеству  $T^{(R)}(A_j, \varphi_j^*)$ , т. е.  $I_R$  содержит один элемент, который обозначаем  $j_R$ . Таким образом, тип объекта определяется как  $A_{j_R}$ . Разворот объекта задается углом  $\alpha_i$ , так как при фиксированном типе объекта по определению  $(\varepsilon, \beta)$ -устойчивости только для углов, лежащих в  $\beta$ -окрестности угла вида  $\varphi_{j_R}^* + \Delta\varphi$ , выполняются неравенства

$$\psi_q(A_{j_R}, \varphi_{j_R}^*) - \varepsilon_q^{(j)} \leq \psi_q(g_{\Delta\varphi}(A_{j_R}), \varphi_{j_R}^* + \Delta\varphi) \leq \psi_q(A_{j_R}, \varphi_{j_R}^* + \varepsilon_q^{(j)}),$$

$$q=1, \dots, R$$

аналогичные (2). Следовательно,  $\alpha_i = \varphi_{j_R}^* + \Delta\varphi$ , откуда  $\Delta\varphi = \alpha_i - \varphi_{j_R}^*$ , т. е. объект  $A_{j_R}$  развернут относительно начального положения на угол  $\alpha_i - \varphi_{j_R}^*$ .

Утверждение I доказано.

Итак, задача распознавания и определения ориентации серии объектов свелась к выбору  $(\varepsilon, \beta)$ -достаточного набора признаков. Формирование набора признаков можно проводить разными способами. Ниже описывается последовательная процедура, суть которой состоит в том, что признаки строятся по мере рассмотрения объектов, что существенно уменьшает вычислительные затраты по сравнению с любыми другими способами, особенно при формировании признаков для большой серии объектов. При этом, правда, количество и вид признаков зависят от порядка рассмотрения объектов и не гарантируется, что будет найден минимально возможный набор.

Признаки представляются в виде

$$\psi_q(A, \varphi) = \sum_{s=1}^m c_s^{(q)} \Phi_s(A, \varphi), \quad q = 1, \dots, R, \quad (9)$$

где  $c_s^{(q)}$ ,  $(s = 1, \dots, m)$  — неизвестные коэффициенты;  $\Phi_s(A, \varphi)$  — базисные признаки типа (1), имеющие следующий конкретный вид [1]:

$$\Phi_s(A, \varphi) = \frac{1}{k} \sum_{i=2}^k f_s(\rho^2(x_i, u)),$$

где  $f_s(\eta)$ ,  $(s = 1, \dots, m)$  — система ортогональных полиномов.

Величины  $\varepsilon_q^{(j)}$  вычисляем по формулам

$$\varepsilon_q^{(j)} = \sum_{s=1}^m |c_s^{(q)}| \varepsilon_{s,j};$$

$$\varepsilon_{s,j} = \max_{\varphi} \max_{\substack{|\Delta x_i^{(1)}| < \Delta \\ |\Delta x_i^{(2)}| < \Delta \\ |\Delta u_0^{(1)}| < \Delta \\ |\Delta u_0^{(2)}| < \Delta}} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |f_s((x_i^{(1)} + \Delta x_i^{(1)} - u_0^{(1)} - \Delta u_0^{(1)} - \\ - r \cos \varphi)^2 + (x_i^{(2)} + \Delta x_i^{(2)} - u_0^{(2)} - r \sin \varphi)^2) - f_s(\rho^2(x_i, u))|, \quad (10)$$

где  $\Delta$  — число, определяемое экспериментально.

Работа процедуры формирования признаков начинается с рассмотрения объекта  $A_1$ . Признак  $\Psi_1(A, \varphi)$  прежде всего должен быть  $(\varepsilon, \beta)$ -устойчивым для объекта  $A_1$ .

*Утверждение 2.* Если некоторый признак  $\Psi(A, \varphi)$   $(\varepsilon, \beta)$ -устойчив для объекта  $A$ , то точка устойчивости  $\varphi^*$  доставляет глобальный экстремум признаку  $\Psi(A, \varphi)$  или находится в  $\beta$ -окрестности глобального экстремума.

Доказательство. Пусть  $\varphi^*$  — точка устойчивости. Тогда из определения 1 при  $R=1$  следует, что промежуток

$$\psi(A, \varphi^*) - \varepsilon, \psi(A, \varphi^*) + \varepsilon], \quad (11)$$

в который вырождается множество  $T^{(R)}(A, \varphi^*)$ , не пересекается с промежутками

$$[\psi(A, \varphi) - \varepsilon; \psi(A, \varphi) + \varepsilon], \varphi \in (\varphi^* - \beta; \varphi^* + \beta). \quad (12)$$

Непересекаемость (11) и (12) влечет выполнимость одного из двух неравенств

$$\psi(A, \varphi^*) - \varepsilon > \psi(B, \varphi) + \varepsilon, \varphi \in (\varphi^* - \beta; \varphi^* + \beta); \quad (13)$$

$$\psi(A, \varphi^*) + \varepsilon < \psi(A, \varphi) - \varepsilon, \varphi \in (\varphi^* - \beta; \varphi^* + \beta). \quad (14)$$

Из (13) следует, что

$$\psi(A, \varphi^*) > \psi(A, \varphi), \varphi \in (\varphi^* - \beta; \varphi^* + \beta),$$

т. е.  $\varphi^*$  — точка глобального максимума или лежит в ее окрестности.

Согласно (14)  $\varphi^*$  — точка глобального минимума или лежит в ее  $\beta$ -окрестности.

Утверждение 2 доказано.

Для обеспечения  $(\varepsilon, \beta)$ -устойчивости признака  $\Psi_1(A, \varphi)$  вида (9) для объекта  $A_1$  достаточно, чтобы вектор коэффициентов  $=_{(1)} c^{(1)}(c_1^{(1)}, \dots, c_s^{(m)})$ , следуя утверждению 1 и неравенствам (13) и (14), удовлетворял одному из двух неравенств

$$\max_{\varphi \in [0, 2\pi]} \sum_{s=1}^m c_s^{(1)} \Phi_s(A_1 \varphi) \geq \max_{\varphi \in G_1(c^{(1)})} \sum_{s=1}^m c_s^{(1)} \Phi_s(A_1 \varphi) + 2 \sum_{s=1}^m |c_s^{(1)}| \varepsilon_{s,1}; \quad (15)$$

$$\min_{\varphi \in [0, 2\pi]} \sum_{s=1}^m c_s^{(1)} C_s^{(1)} \Phi_s(A_1 \varphi) \leq \min_{\varphi \in G_1(c^{(1)})} \sum_{s=1}^m c_s^{(1)} \Phi_s(A_1 \varphi) - 2 \sum_{s=1}^m |c_s^{(1)}| \varepsilon_{s,1}, \quad (16)$$

где  $G_1(c^{(1)}) = \{\varphi: \varphi \in (\varphi_1^*(c^{(1)}) - \beta; \varphi_1^*(c^{(1)}) + \beta)\}$ , и величины  $\varepsilon_{s,1} \times (s = 1, \dots, m)$  вычисляются согласно (10).

Утверждение 3. Если вектор  $c^{(1)}$  удовлетворяет неравенству (15), то вектор  $(-c^{(1)})$  удовлетворяет (16), и наоборот, если  $c^{(1)}$  удовлетворяет (16), то  $(-c^{(1)})$  удовлетворяет (15).

Доказательство. Пусть  $c^{(1)}$  удовлетворяет (15). Умножаем правую и левую части (15) на  $(-1)$ . Неравенство (15) меняется на противоположное

$$-\left( \max_{\varphi \in [0, 2\pi]} \sum_{s=1}^m c_s^{(1)} \Phi_s(A_1, \varphi) \right) < -\max_{\varphi \in G_1(c^{(1)})} \sum_{s=1}^m c_s^{(1)} \Phi_s(A_1 \varphi) - 2 \sum_{s=1}^m |c_s^{(1)}| \varepsilon_{s,1},$$

с учетом простого соотношения  $-\max_z f(z) = \min_z (-f(z))$  (неравенство (17) переписывается в виде

$$\min_{\varphi \in [0, 2\pi]} \sum_{s=1}^m (-c_s^{(1)}) \Phi_s(A_1, \varphi) < \min_{\varphi \in G_1(c^{(1)})} \sum_{s=1}^m -c_s^{(1)} \Phi_s(A_1 \varphi) - 2 \sum_{s=1}^m |c_s^{(1)}| \varepsilon_{s,1}.$$

Так как точка  $\varphi_{\lambda}^*$ , доставляющая максимум в (15) справа и минимум в (18) справа, не меняется, то множество  $G_1(c^{(1)})$  совпадает со множеством  $G_1(-c^{(1)})$ . Следовательно, (18) совпадает с (16). Вторая часть утверждения 3 доказывается аналогично с использованием соотношения  $\min_z f(z) = \max_z (-f(z))$ .

Утверждение 3 доказано.

Таким образом, при нахождении вектора  $c^{(1)}$ , обеспечивающего устойчивость признака  $\Psi_1(A, \varphi)$  для объекта  $A_1$ , достаточно рассматривать только одно из неравенств (15), (16).

Опишем последовательную процедуру формирования  $(\varepsilon, \beta)$ -достаточного набора признаков для заданной совокупности объектов  $\{A_j, j=1, \dots, M\}$ .

*Этап 1.* Рассмотрение объекта  $A_1$  и формирование признака  $\Psi_1(A, \varphi)$  вида (9) на основе решения неравенства (15).

*Этап 2.* Пусть рассмотрены объекты  $A_1, \dots, A_l$  и сформированы признаки  $\Psi_q(A, \varphi)$ ,  $q=1, \dots, Q$ . Рассматривается объект  $A_{l+1}$ . Находится точка максимума  $\varphi_{e+1}^*$  признака  $\Psi_1(A_{l+1}\varphi)$ . Множество  $B^*(A_{l+1})$ , как следует из утверждения 1, необходимо задавать в виде

$$B^*(A_{l+1}) = \{\varphi: \psi_1(A_{l+1}, \varphi_{l+1}^*) \leq \psi_1(A_{l+1}\varphi) + 2\varepsilon_1^{(l+1)}\}, \quad (19)$$

так как в результате влияния шумов точка максимума не выйдет за пределы множества (19). Проверяется  $(\varepsilon, \beta)$ -достаточность набора признаков для совокупности объектов  $A_1, \dots, A_l, A_{l+1}$ . Проверка  $(\varepsilon, \beta)$ -устойчивости сводится к проверке пересекаемости множества  $T^{(Q)}(A_{l+1}, \varphi_{l+1}^*)$  со множествами  $T^{(Q)}(A_{l+1}, \varphi)$  для  $\varphi \in E_{l+1}$ , где

$$E_{l+1} = G_{l+1}(c^{(1)}) \cap B^*(A_{l+1}).$$

Для  $\varphi \notin B^*(A_{l+1})$  пересекаемости нет.

Если  $E_{l+1} = \emptyset$  или пересекаемости нет, то проверяется свойство (5) определения 2. Для этого рассматривается пересекаемость  $T^{(Q)}(A_{l+1}, \varphi_{l+1}^*)$  со множествами  $T^{(Q)}(A_n, \varphi)$ ,  $n=1, \dots, l$ ,

$\varphi \in B^*(A_{l+1})$ . Множество  $T^{(Q)}(A_j, \varphi)$  — параллелепипеды. Два параллелепипеда не пересекаются, если хотя бы для одного номера  $q$  не пересекаются промежутки  $[\psi_q - \varepsilon_q^{(j)}; \psi_q + \varepsilon_q^{(j)}]$  и  $[\psi_q - \varepsilon_q^{(n)}; \psi_q + \varepsilon_q^{(n)}]$ .

*Этап 3.* Если набор признаков  $\Psi_q(A, \varphi)$ ,  $q=1, \dots, Q$  не является  $(\varepsilon, \beta)$ -достаточным для совокупности объектов  $A_1, \dots, A_{l+1}$ , то вводится признак  $\Psi_{Q+1}(A\varphi)$  вида (9), коэффициенты которого выбираются таким образом, чтобы промежуток

$$[\psi_{Q+1}(A_{l+1}, \varphi_{l+1}^*) - \varepsilon_{Q+1}^{(l+1)}; \psi_{Q+1}(A_{l+1}, \varphi_{l+1}^*) + \varepsilon_{Q+1}^{(l+1)}] \quad (20)$$

не пересекался с промежутком

$$[\psi_{\min}(A_{l+1}, c^{(Q+1)}); \psi_{\max}(A_{l+1}, c^{(Q+1)})], \quad (21)$$

а промежуток

$$\left[ \min_{\varphi \in B^*(A_{l+1})} \psi_{Q+1}(A_{l+1}, \varphi) - \varepsilon_{Q+1}^{(l+1)}; \max_{\varphi \in B^*(A_{l+1})} \psi_{Q+1}(A_{l+1}, \varphi) + \varepsilon_{Q+1}^{(l+1)} \right] \quad (22)$$

с промежутком

$$\left[ \min_{j \in J_{Q+1}} (\psi_{Q+1}(A_j, \varphi_j^*) - \varepsilon_{Q+1}^{(j)}); \max_{j \in J_{Q+1}} (\psi_{Q+1}(A_j, \varphi_j^*) + \varepsilon_{Q+1}^{(j)}) \right], \quad (23)$$

где

$$\psi_{\min}(A_{l+1}, c^{(Q+1)}) = \min_{\varphi \in E_{l+1}} \psi_{Q+1}(A_{l+1}, \varphi) - \varepsilon_{Q+1}^{(l+1)};$$

$$\psi_{\max}(A_{l+1}, c^{(Q+1)}) = \max_{\varphi \in E_{l+1}} \psi_{Q+1}(A_{l+1}, \varphi) + \varepsilon_{Q+1}^{(l+1)};$$

$J_{Q+1}$  — множество тех номеров  $j \in \{1, \dots, l\}$ , для которых параллелепипед  $T^{(Q)}(A_j, \varphi_j^*)$  пересекается для некоторых  $\varphi \in B^*(A_{l+1})$  с параллелепипедом  $T^{(Q)}(A_{l+1}, \varphi)$ .

Непересекаемость (20) и (21) обеспечивает  $(\varepsilon, \beta)$ -устойчивость расширенного набора признаков для объекта  $A_{l+1}$ , а непересекаемость (22) и (21) обеспечивает выполнение условия (5). Аналогично тому, как из непересекаемости (11) и (12) следуют неравенства (13), (14), получаются соответствующие неравенства и в рассматриваемом случае. Неравенства задают условия на вектор  $c^{(Q+1)}$ , определяющий признак  $\Psi_{a+1}(A, \varphi)$  вида (9).

Таким образом, процедура формирования  $(\varepsilon, \beta)$ -достаточного набора признаков сводится в общем случае к решению на каждом этапе одного или двух неравенств, определяющих условия на коэффициенты разложения признаков по базисным признакам. Распознавание и определение ориентации сводится к поиску устойчивых точек по значениям сформированных признаков.

Поступила в редколлегию 09.07.88

УДК 62.506.2

В. Ф. АНАНИН, канд. техн. наук

### БИОРЕГУЛЯЦИЯ АККОМОДАЦИОННОГО АППАРАТА ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА

Ранее [1—3] на основе анализа оптической системы глаза и экспериментальных исследований аккомодационного аппарата в норме и у лиц с искусственным хрусталиком был разработан новый вариант механизма аккомодации глаза человека, существенно дополняющий общепринятую аккомодационную теорию Гельмгольца. Фактически была открыта новая закономерность настройки оптической системы глаза на резкость при аккомодации и новое явление, связанное с упругой деформацией опорной оболочки глаза-склеры. Механизм аккомодации, как оказалось, сопровождается одновременным изменением формы хрусталика

и длины передне-задней оси глазного яблока за счет смещения его заднего полюса, обусловленного упругой деформацией склеры. Подобная трактовка механизма аккомодации потребовала иных представлений о биомеханике аккомодационного аппарата, отличных от тех, которые приняты в аккомодационной теории Гельмгольца. Более того, последняя неразрывно связана с пониманием механизма биорегуляции аккомодационного аппарата, который до настоящего времени во многом остается не ясным.

В соответствии с рассмотренными ранее механизмами регуляции других функциональных систем, основанными на двойном реципрокном принципе иннервации, роль эффектора в аккомодационном аппарате выполняют медленнофазные холинергические (парасимпатические) меридиональные мышечные волокна ( $\text{ЭФ}_\beta$ ), т. е. мышца Брюкке. Согласно этому принципу эффекторы АНС ( $\text{ЭФ}_\beta$ ) иннервируются холинергическими (парасимпатической частью) и адренергическими нервными волокнами, терминальные медиаторы которых соответственно  $M_\beta$  и  $M_\alpha$  поступают на пост-синаптическую мембрану эффекторной клетки, где и завершается двойной реципрокный принцип иннервации и регуляции (ДПР) на нейрональном уровне в виде биохимических процессов. Причем в соответствии с ранее высказанным априорным предположением при  $M_\alpha \gg M_\beta$  тонус мышечных волокон возрастает, а их длина увеличивается. И, наоборот, при  $M_\beta \gg M_\alpha$ , их тонус понижается, а длина укорачивается. Согласно же закону Старлинга сила сокращения мышцы в общем виде на определенном динамическом участке пропорциональна длине мышцы, т. е.  $F_M = k l_M$ . Механизм же биомеханического равновесия между аккомодационной мышцей (АМ) и хрусталиком сводится к реципрокному взаимодействию двух основных сил, одна из которых  $F_M$  со стороны АМ натягивает цинновы связки и тем самым уплощает хрусталик, а другая  $F_x$ , обусловленная упругими эластическими свойствами хрусталика, натягивает цинновы связки в противоположном направлении, давая возможность хрусталику принять более шаровидную форму. Поэтому это биомеханическое равновесие можно представить в виде векторного уравнения  $F_x = F_M$  (1).

Поскольку сила  $F_M$  согласно ДПР формируется двумя реципрокными каналами иннервации, то она может ослабевать или усиливаться в зависимости от превалирующей активности той или иной составляющей. Поэтому уравнение (1) может быть конкретизировано:

$$\bar{F}_{x1} + \bar{F}_{\beta 0} + \bar{F}_{\alpha 1} + \Delta \bar{F}_{\beta 1} = \bar{F}_{\alpha 0} + \Delta \bar{F}_{\alpha 1}, \quad (2)$$

где  $F_{\beta 0}$ ,  $F_{\alpha 0}$  — силы, обусловленные тонусом АМ в фазе медленного сна (ФМС) со стороны холинергического и адренергического каналов,  $F_\alpha$  — сила, создаваемая эластическим компонентом АМ,  $\Delta F_\beta$ ,  $\Delta F_\alpha$  — приращение или уменьшение силы сокращения АМ за счет усиления активности в холинергическом или адренергическом канале ДПР. Знак плюс указывает на сокращение АМ, а знак минус — на ее удлинение.

Приращение сил  $\Delta P_\beta$  и  $\Delta F_v$  осуществляется за счет стимуляции парасимпатической зоны ретикулярной формации ( $P\Phi_\beta$ ) и адренергической зоны ретикулярной формации ( $P\Phi_v$ ) афферентными и кортикальными сигналами. В зависимости от вида стимуляции определяется характер тонуса АМ. Судя по (2), наименьшая величина тонуса АМ в ФМС, так как  $\Delta F_\beta$  и  $\Delta F_v$  практически близки к нулю. Поэтому это уравнение в ФМС примет вид

$$\bar{F}_{x0} + \bar{F}_{\beta 0} + \bar{F}_{v0} = \bar{F}_{v0}. \quad (3)$$

Биомеханическое же равновесие в этом случае наступает при более шаровидной форме хрусталика. Поэтому в ФМС рефракция глаза становится миопической [4]. В этой фазе сна вследствие резкого уменьшения  $\Delta F_\beta$  и  $\Delta F_v$  из-за прекращения стимулирующего действия зон  $P\Phi_\beta$  и  $P\Phi_v$  со стороны афферентных сигналов с экстерорецепторов разной модальности действие упругих сил хрусталика и эластического компонента мышцы, совпадающее по направлению, становится превалирующим. При этом биомеханическом равновесии оно уравнивается более слабым значением силы, формируемой адренергическим каналом. Иначе говоря, биомеханическое равновесие ЭФ $\beta$  в ФМС можно классифицировать как исходное, при котором тонус мышечных волокон максимально расслаблен.

При бодрствовании, особенно в темноте, когда резко возрастает  $\Delta F_v$ , тонус АМ повышается и как следствие этого хрусталик уплощается, а рефракция глаза ослабевает.

Таким образом, цинновы связки находятся в непрерывном натяжении с обеих сторон силами  $F_x$  и  $F_v$ . И в зависимости от превалирующего значения той или иной силы их натяжение смещается то в сторону хрусталика, то в сторону АМ. В первом случае это натяжение сопровождается усилением рефракции глаза вследствие изменения хрусталика в шаровидную форму, а во втором — ослаблением, так как форма хрусталика уплощается.

Итак, регуляция рефракции как основного регулируемого параметра в биорегуляции аккомодационного аппарата путем изменения формы хрусталика осуществляется, с одной стороны, по холинергическому каналу, а с другой — по адренергическому каналу. Эта регуляция может происходить как произвольно — путем изменения тонуса АМ, так и произвольно — с помощью управляющих сигналов, преимущественно по холинергическому каналу при произвольных актах аккомодации.

С целью более четкого понимания механизма биорегуляции аккомодационного аппарата важно представлять механизм формирования рефракции глаза в онтогенезе и при этом с учетом развития ДПР, включая в том числе и по отношению к этой функциональной системе.

У новорожденных, как известно, рефракция сдвинута в гиперметропическую сторону [5], т. е. у них либо уплощен хрусталик, либо мала передне-задняя ось глаза. Скорее всего имеет место

и то и другое. Основанием для такого предположения служат, с одной стороны, морфологические данные по замерам длины оси глаза, которые свидетельствуют об ее укороченном размере, а с другой — возрастная динамика развития холинергической и адренергической составляющих. У новорожденных, как показывают морфогистологические [6, 7] и функциональные исследования [8], вплоть до 12—14 лет в ДПР имеет место превалирующее влияние адренергической составляющей над холинергической. По мере же роста передне-задней оси глаза, заканчивающегося к 9—12 годам [5], постепенно усиливается активность холинергической составляющей вследствие развития плотности холинергических сплетений и центральных структур холинергического канала. Последнее выравнивает взаимодействие терминальных медиаторов  $M_3$  и  $M_1$  на постсинаптической мембране эффекторной клетки АМ, в результате чего повышается уровень фоновой сократимости мышечных волокон АМ, а вместе с ним хрусталик из уплощенной формы переходит в более шаровидную.

Таким образом, на начальном пути онтогенеза рефракции глаза (до 12—14 лет) переход от гиперметропической рефракции у новорожденных в эмметропическую у подростков происходит за счет одновременного изменения длины оси глаза и онтогенеза ДПР с более поздним формированием, т. е. временным сдвигом по фазе, холинергической составляющей по отношению к адренергической составляющей. Здесь пока не анализируется процесс, связанный с удлинением глаза при аккомодации, так как он обусловлен главным образом механическим фактором.

Рассмотрим возможные варианты формирования рефракции глаза, связанные с теми или иными отклонениями в ДПР. Предположим, что развитие адренергической составляющей по той или иной причине ослаблено. Это может быть вызвано различными причинами, в том числе генетическими. В последнем случае мы имеем дело, видимо, со слабым энергетическим потенциалом  $E$ , адренергической зоны РФ, и как следствие этого слабым активирующим сигналом  $J_3$ , по адренергическому каналу ДПР в адрес АМ. При этом исходный тонус АМ развивается в онтогенезе уже не с таким превалирующим эффектом, как в норме, при формировании эмметропической рефракции. Более того, к 12—14 годам, когда первая стадия онтогенеза ДПР в основном завершается, может сложиться такая ситуация: вместо эмметропической рефракции создается миопическая рефракция небольшой степени. Если АМ при фоновом состоянии, соответствующем «покою» аккомодации, имеет повышенную сократимость, а ее длина укорочена, сила ее сокращения понижается. Такое состояние аккомодационного аппарата характеризуется как ослабление аккомодационной способности. Правда, отдельные авторы [5, 9] квалифицируют его как спазм аккомодации, приводящий к возникновению ложной близорукости. Возможно, что при этой ситуации и возникают спазмы аккомодации, но квалифицировать состояние однозначно в указанной выше форме вряд ли правомерно. Более того,

данное состояние следует рассматривать, с точки зрения автора, как одно из естественных состояний мышечной системы аккомодационного аппарата в ДПР, в которой не отмечалось преобладающего действия адренергической составляющей над холинергической. Это подтверждается экспериментальными исследованиями по определению оптической установки глаз. Так, по данным [5], из 400 обследованных подростков только 20 % оказались с эметропической установкой, а около 80 % — с миопической; из 165 обследованных эметропических глаз миопическую установку нашли в 162 глазах [10].

Таким образом, у 80 % лиц молодого возраста с эметропической рефракцией оптическая установка является миопической [5], что указывает на преобладающую роль холинергической составляющей в их ДПР. Итак, формирование слабой миопической рефракции на первой стадии ее онтогенеза, возникающей вследствие ослабленного развития адренергической составляющей в ДПР, следует, видимо, оценивать, как один из возможных вариантов рефракционного онтогенеза. И, наоборот, при чрезмерно усиленном развитии адренергической составляющей ДПР, сопровождающемся повышенным превалированием адренергической составляющей над холинергической, к 12—14 годам будет сформирована гиперметропическая рефракция. При этом имеется в виду в качестве причины гиперметропии укороченная длина глаза. И лишь при оптимальном синхронном онтогенезе обеих составляющих ДПР формируется промежуточная между ними средняя рефракция в виде эметропической. Хотя с адаптационной точки зрения у человека к завершению первой стадии онтогенеза ДПР должна быть эметропическая или же небольшой степени, что наиболее оптимально, гиперметропическая рефракция.

Первый период онтогенеза ДПР, а вместе с ним и онтогенез рефракции глаза, синхронно протекает с развитием других функциональных систем, например пупилломоторной, глазодвигательной, сердечно-сосудистой, дыхательной и др. Этот факт указывает на наличие общего для них знаменателя, роль которого выполняет РФ и, в частности, две ее зоны: РФ<sub>3</sub> и РФ<sub>4</sub>. Именно онтогенез РФ определяет в конечном итоге онтогенез функциональных систем организма, в том числе и рефракции глаза. Поэтому неудивительно, что лица с миопической установкой, т. е. с преобладающей холинергической составляющей в их ДПР, имеют общие признаки для функциональных систем, характерные для этого типа нервной системы. Так, лица с миопической установкой отличаются несколько суженным зрачком и более вялыми зрачковыми реакциями.

Учитывая, что формирование рефракции к концу первой стадии онтогенеза является результатом соотношения активности составляющих ДПР, по его значению можно судить о преобладающем развитии той или иной составляющей. Так, при миопической установке преобладающей является холинергическая составляющая, а при адренергической — гиперметропическая. Эмет-

ропическую рефракцию можно оценивать как результат сбалансированного развития обеих составляющих.

Понятно, что характер развития составляющих ДПР одновременно отражается на всех функциональных системах. Рефракция же в данном случае является всего лишь наиболее тонким индикатором первой стадии онтогенеза ДПР. Хотя не в меньшей степени эту роль выполняет и зрачок глаза.

Таким образом, тип рефракции к концу ее онтогенеза определяется характером первой стадии онтогенеза ДПР. Для холинергетиков (лиц с превалирующей активностью холинергической составляющей) наиболее вероятным типом рефракции является миопическая небольшой степени, для адренергетиков (лиц с превалирующей активностью адренергической составляющей) — гиперметрическая небольшой степени и для холино-адренергетиков (лиц со сбалансированным развитием обеих составляющих) — эмметропическая рефракция. В зависимости от уровня превалирования той или иной составляющей над другой соответственно определяется степень отклонения рефракции от эмметропической.

Итак, первая стадия онтогенеза рефракции может заканчиваться тремя типами: миопической, эмметропической и гиперметропической, которые следует рассматривать как нормальные рефракции. И в этом смысле вывод Е. Ж. Трона о том, что комбинационная миопия и гиперметропия являются наряду с эмметропией нормальными биологическими вариантами рефракции, можно считать правильным. И если 80 % молодых лиц имеют миопическую установку, то это указывает лишь на то, что первый тип рефракции на ее первой стадии онтогенеза среди молодых лиц является преобладающим. При этом мы пока не принимаем во внимание факторы другого характера, оказывающие влияние на изменение рефракции, не связанные с онтогенезом ДПР.

Вторая стадия онтогенеза рефракции включает возрастной период от 15 до 35—40 лет. Этот период отличается относительно стабильной рефракцией, сформировавшейся на первой стадии. И, наконец, третья стадия онтогенеза рефракции глаза относится к возрастному периоду от 40 лет и старше. В этот период, как известно, ослабевает функция адренергической составляющей и в ДПР роль холинергической составляющей постепенно становится превалирующей. Исходя из (2) на этом возрастном отрезке индивида следовало бы ожидать постепенной трансформации рефракции в миопическую сторону. Однако этого не происходит по той причине, что одновременно со снижением активности адренергической составляющей понижаются упругие и эластические свойства хрусталика, т. е. сила  $F_x$ . Об уменьшении последней косвенно свидетельствует кривая Дондерса. Уменьшение размера зрачка, урежение ритма сердца, дыхания, свойственные для этого возраста, дополнительно, с одной стороны, подтверждают ослабление адренергической составляющей, а с другой — синхронность их изменения с этой стадией онтогенеза рефракции.

Отметим еще один важный факт. Выше показано, что тонус АМ создается эфферентными активирующими сигналами  $J_{\alpha\beta}$  и  $J_{\alpha\gamma}$ , холинергического и адренергического каналов ДПР, очагом зарождения которых является аутохтонная генерация нервных импульсов ретикулярных нейронов зон  $RF_{\beta}$  и  $RF_{\gamma}$ . Но сами эти зоны, их активирующая функция находятся под контролем афферентных сигналов разной модальности, включая в том числе и кортикальные сигналы, которые оказывают на них стимулирующее воздействие. Поэтому данные сигналы отличаются высокой вариабельностью и как следствие этого флуктуирует рефракция глаза. Особенно четко это обнаруживается при воздействии тех или иных фармакологических препаратов, оказывающих стимулирующее воздействие на холинергический или адренергический канал, а то и одновременно на оба канала. И в зависимости от превалирующего эффекта стимуляции того или иного канала в адекватную сторону происходит сдвиг рефракции глаза, хотя и не на столь резкую величину. Так, 0,1 % раствор адреналина стимулирует преимущественно адренергическую составляющую, в результате чего тонус АМ возрастает, АМ удлиняется и хрусталик уплощается. Следствием такого сдвига в оптической системе глаза является удаление от глаза ближней точки ясного видения. И таких примеров немало.

В этой связи особый интерес представляет феномен сумеречной и ночной миопии. В данном случае с уменьшением освещенности снижается стимуляция зон  $RF_{\beta}$  и  $RF_{\gamma}$ . В результате ослабляются по своему энергетическому потенциалу активирующие сигналы в обоих каналах ДПР, а вместе с ними и тонус АМ. При ослабленном тонусе последней активно начинают действовать чисто пассивные механические составляющие (2): силы  $F_{\alpha}$  и  $F_{\chi}$  эластического компонента и хрусталика, действующие в одном направлении, способствуя таким образом переходу хрусталика от уплощенной формы при повышенном тонусе мышцы в шаровидную при его снижении. В итоге происходит сдвиг рефракции в миопическую сторону.

До сих пор речь шла о трех нормальных типах рефракции глаза, формирование которых определяется онтогенезом рефракции. А между тем в оптической системе глаза под влиянием внешних факторов происходят такие сдвиги, которые приводят к резким аномалиям, например близорукости. В связи с этим возникает опасность отождествления миопической рефракции с близорукостью. Попытаемся уточнить эти различия.

Формирование миопической рефракции на первой стадии онтогенеза рефракции отдельными исследователями оценивается как результат спазма аккомодации и классифицируется в виде ложной близорукости. Естественное завершение у отдельных индивидов первой стадии онтогенеза рефракции ее миопическим типом вряд ли правомочно оценивать в виде спазма аккомодации. Тем более само понятие спазма мышцы, в том числе и АМ, никак не согласуется с процессом первой стадии онтогенеза рефракции

и завершающим ее миопическим типом. Возможно, что отдельные случаи и сопровождаются спазмами АМ, но они, видимо, не определяют тот основной контингент лиц, который к окончанию первой стадии онтогенеза имеет миопическую оптическую установку.

Известно [5, 11], что лица с миопическим типом рефракции отличаются слабой аккомодационной способностью, так как их АМ в исходном состоянии находится в более сокращенном виде, что уже само по себе в соответствии с законом Старлинга предопределяет ее ослабленную сократительную способность. С другой стороны, при миопическом типе рефракции снижается нагрузка на аккомодационный аппарат глаза при работе как на близком расстоянии, так и при наблюдении вдаль, что также при длительном временном периоде приводит к частичной атрофии мышцы. Все это вместе взятое и формирует ослабленную аккомодационную способность у лиц с миопическим типом рефракции. Но все это справедливо при условии, если аккомодационный аппарат глаза не испытывает чрезмерной перегрузки, связанной с работой глаз на близком расстоянии, т. е. на отрезке менее 400 мм. В то же время известны случаи гипертрофированного цилиарного тела у миопов, что свидетельствует о чрезмерной перегрузке их аккомодационного аппарата [12]. Признак ослабленной аккомодационной способности отдельными исследователями [11] рассматривается как причина возникновения и прогрессирования близорукости. При этом они исходят из предположения, что ослабленная аккомодационная способность не в состоянии обеспечить получения и длительного сохранения четкого изображения на сетчатке при работе глаз на близком расстоянии и она, по их мнению, начинает компенсироваться удлинением, а точнее, ростом длины глаза в передне-заднем направлении. В связи с этим авторы вынуждены были допустить наличие специального «центра управления ростом глаза», который, по их мнению, не анатомическое, а функциональное понятие, в виде системы нейро-гуморальных влияний, обеспечивающей рост глаза и направленное формирование его рефракции. Пока что такого центра никто из морфологов и гистологов не обнаружил и вряд ли он будет найден в будущем, тем более самими же авторами он не определяется как анатомический субстрат. Вряд ли можно согласиться и с термином «ложной близорукости», а тем более считать в качестве ее причины спазм аккомодации.

Результаты наших многолетних исследований приводят к выводу, что причиной близорукости является изменение передне-задней оси глазного яблока относительно того ее значения, которое складывается на первой стадии онтогенеза рефракции, т. е. к 12—14 годам. Тем более большинство авторов указывает, что рост длины глаза окончательно заканчивается к 9—12 годам. Иначе говоря, природа близорукости является осевой, связанной с удлинением оси глазного яблока после окончательного завершения его роста. И в этом смысле можно согласиться с А. И. Дашевским, утверждающим, что «основным при решении проблемы

происхождения миопии (а мы бы сказали близорукости, если под термином миопии иметь ввиду один из трех типов рефракции, формирующихся на первой стадии ее онтогенеза) является вопрос о причине и механизме удлинения передне-задней оси глаза» [4, с. 44]. Именно выяснению этого вопроса и были посвящены наши многолетние исследования, закончившиеся раскрытием механизма удлинения передне-задней оси глаза при близорукости. Здесь же отметим лишь саму суть полученных результатов по этому вопросу. Удлинение оси глаза происходит в результате накопления остаточных микродеформаций в склере, главным образом ее заднем полюсе, возникающих под влиянием чрезмерного растяжения глазного яблока в процессе длительной работы глаз на близком расстоянии, менее 400 мм.

Кратко рассмотрим роль наследственного фактора в формировании рефракции и близорукости. Тот факт, что более 92 % новорожденных рождаются с гиперметропической рефракцией и лишь 2 % — с миопической, на первый взгляд, указывает на то, что наследственный фактор не играет какой-либо существенной роли в формировании близорукости. А с другой стороны, выше показано, что первая стадия онтогенеза как стадия окончательного генетического завершения рефракции глаза для разных индивидов может заканчиваться эметропической, миопической и гиперметропической типами рефракций. Причем последние две можно рассматривать как результат флюктуаций эметропической рефракции в минусовую сторону для миопической и плюсовую — для гиперметропической. Понятно, что как всякие флюктуации они должны отличаться от среднего значения, т. е. эметропической рефракции, несущественно. Так происходит, если судить по результатам эпидемиологических обследований [5]. Сами же величины этих отклонений для нормы в миопическую сторону не превышают 0,5—1,0, а в гиперметропическую — +0,5—0,75 диоптрий.

С учетом возможной трансформации рефракции на последующих стадиях онтогенеза более оптимальным, с адаптационной точки зрения, следует считать гиперметропический вариант рефракции слабой степени — 0,5—0,75 диоптрий. В этом случае у глаза имеется определенный резерв, в сравнении с эметропией, в переходе в миопическую рефракцию, а тем более близорукый глаз. При этом само понятие «близорукости» и близорукого глаза рассматривается автором как результат трансформации одного из указанных биологических типов рефракции в близорукый глаз вследствие механического удлинения передне-задней оси по отмеченной выше причине. Причем, чем выше уровень изменения длины глаза, тем выше степень близорукости. Что же касается рефракции глаза, определяемой в соответствии с правилами геометрической оптики как  $D = \frac{1000}{f'}$  то она, особенно при небольших удлинениях глаза, остается практически неизменной.

Иначе говоря, близорукость не вносит каких-либо кардинальных изменений в рефрактогенез, т. е. величину рефракции, сформировавшуюся на первой стадии ее онтогенеза. В связи с этим попытки отдельных авторов [4] делить рефракцию глаза на первичную и вторичную вряд ли имеет под собой какую-либо почву. Дело в том, что рефракция, определяемая указанной выше формулой, у каждого человека одна. А процесс ее формирования завершается у него к концу первой стадии онтогенеза. При этом мы имеем ввиду рефракцию оптической системы глаза, соответствующую наблюдению вдаль. Конечно, в процессе аккомодации она изменяется, достигая своего максимального значения при фиксации ближней точки индивида. И тем не менее именно рефракцией для дали завершается первая стадия рефрактогенеза и в этом смысле она действительно является для каждого индивида своей, единственной и неизменной.

Признавая миопическую, эметропическую и гиперметропическую рефракции нормальными биологическими вариантами рефракции первой стадии рефрактогенеза, следует одновременно признать и наличие определенной закономерности в их формировании. Штейгер такую закономерность видел в случайном сочетании оптических элементов глаза. При этом каждый элемент оптической системы глаза по его гипотезе варьирует в соответствии с биномиальной вариационной кривой. Соответственно и рефракция глаза, как результат интегрального отражения случайного сочетания оптических элементов глаза, также формируется по законам случайности и изменяется по биномиальной кривой. При этом Штейгер считал, что по этому же закону формируется и рефракция близоруких глаз. Иначе говоря, формирование любого типа рефракции, в том числе и близоруких глаз, он рассматривал как результат детерминированного процесса, рефрактогенез которых обусловлен генетическими признаками. Не признавая роли внешнего фактора в искусственном механическом удлинении переднезадней оси близоруких глаз, последние он рассматривал как нормальный биологический вариант. И в этом, на наш взгляд, заключается принципиальная ошибка теории Штейгера, которая за рубежом вплоть до настоящего времени является доминирующей по механизму рефрактогенеза и механизму происхождения близорукости.

Не вдаваясь в подробный анализ теории Штейгера, ошибочность которой в трактовке механизма происхождения близорукости очевидна, тем не менее сам факт варьирования параметров отдельных элементов оптической системы глаза в соответствии с биномиальной вариационной кривой заслуживает внимания. Тем более он подтвержден и другими авторами [5]. Наличие этого факта требует ответа на вопрос: каким образом к окончанию первой стадии рефрактогенеза, т. е. к 12—14 годам, осуществляется формирование эметропической рефракции с ее флюктуационными отклонениями в минусовую—миопическую и плюсовую—гиперметропическую стороны? Хотя в этом случае возможно и по-

лучается биномиальная кривая распределения рефракций, но ее мода-диапазон флюктуаций, мизерный, исчисляемый менее 1,0 диоптрий в минусовую и плюсовую стороны. Уже этот факт сам по себе не исключает случайную вероятность формирования рефракции, а наоборот, указывает на ее четкую закономерность, организации, заканчивающуюся к 12—14 годам сфокусированным эмметропическим типом рефракции с небольшими ее отклонениями в ту или иную сторону.

В то же время наличие асимметричности в биномиальной кривой за счет удлинения ее миопического колена указывает лишь на то, что в эту область попали лица с искусственным удлинением передне-задней оси глаза, по указанной выше причине, ошибочно принимаемые Штейгером за нормальный биологический вариант рефракции. Отсутствие у последнего четкой аргументации в объяснении этого факта ставило под сомнение всю его теорию, на что указывали наши отечественные исследователи, не говоря уже об ошибочности механизма происхождения близорукости.

Важно ответить на последний вопрос: в чем заключается механизм закономерности формирования рефрактогенеза, заканчивающегося тремя типами рефракций, сфокусированными вблизи ее среднего значения—эмметропии? Механизм этой закономерности автор видит не в случайном сочетании оптических элементов, а в непрерывном контроле, управлении оптической системы глаза через эффекторный аппарат аккомодации со стороны кортикальных структур. Иначе говоря, постоянная адаптационная настройка оптической системы глаза, управляемая кортикальными двигательными центрами, в конечном итоге обеспечивает рефракцию глаза, адекватную для жизнеобеспечения индивида. А это значит она должна формировать четкую видимость как вдаль, так и вблизи. Для обеспечения первого условия, исходя из правил геометрической оптики, такая рефракция, как минимум должна быть эмметропической и лишь в крайнем случае миопической с очень небольшим отклонением от эмметропической. Именно таковой она и становится в конце первой стадии рефрактогенеза. Получается, что индивид своим непрерывным управлением оптической системой глаза как бы подстраивает ее рефракцию к тем типовым условиям работы зрительного аппарата, которые характерны для поведения человека. При этом рефрактогенез связан с постепенной трансформацией явно выраженной гиперметропии у новорожденных к эмметропии в 12—14 лет.

Поскольку управление эффекторным аппаратом аккомодации осуществляется в соответствии с ДПР, то его эффективность, а вместе с ним и характер протекания первой стадии рефрактогенеза, как впрочем и последующих его стадий, в значительной степени определяется соотношением активности холинергической и адренергической составляющих. Так, при наличии преимущественной активности холинергической составляющей над адренергической наиболее вероятным типом рефракции в конце первой стадии рефрактогенеза следует ожидать миопический. А при преи-

мущественной активности адренергической составляющей над холинергической, наоборот, гиперметропический. Иначе говоря, тип нервной системы, характеризующийся соотношением активности ее составляющих как бы предопределяет тип будущей рефракции глаза. И в этом смысле рефрактогенез отягощен наследственными признаками. Понятно, что эметропическая рефракция является результатом сбалансированной активности обеих составляющих ДПР.

**Список литературы:** 1. *Ананин В. Ф.* Аккомодация как биологическая система автоматического регулирования//Физиол. журн. СССР. 1975. № 8. С. 1190—1196. 2. *Ананин В. Ф.* Новый вариант схематического глаза//Физиол. журн. СССР. 1975. № 11. С. 1634—1639. 3. *Ананин В. Ф., Бегунова Г. Б., Киприянова Т. И.* Объективная регистрация аккомодации глаза при интраокулярной коррекции афакии//Офтальмолог. журн. 1972. № 2. С. 92—97. 4. *Дашевский А. И.* Близорукость. Л., 1962. 146 с. 5. *Ватченко А. А.* Спазм аккомодации и близорукость., 1977. 117 с. 6. *Швалев В. Н., Стропус Р. А.* Медиаторный этап функционирования ВНС-системы в постнатальном онтогенезе и значение его исследований для клиники//Арх. анатомии, эмбриологии, гистологии. 1979. № 5. С. 5—20. 7. *Возрастание изменения холин- и адренергической иннервации сердца человека*//Р. И. Абрайтис, В. С. Вайчекукас, Р. А. Стропус, К. А. Тамашаускас//Кардиология. 1981. № 9. С. 106—108. 8. *Шаловалов С. Л., Мац К. А.* Клиническое изучение аккомодации и ее расстройств//Пробл. рефракции глаза. М., 1974. С. 19—34. 9. *Дашевский А. И.* Ложная близорукость. М., 1973. 151 с. 10. *Волков В. В., Колесникова Л. Н.* Аккомодация и рефракция по материалам исследования с помощью кобальтового стекла//Офтальмолог. журн. 1973. № 3. С. 172—176. 11. *Аветисов Э. С.* Близорукость. М., 1986. 238 с. 12. *Радзиховский Б. Л.* Близорукость. М., 1963. 196 с.

*Поступила в редколлегию 10.02.87*

УДК 612.82.014.42.001.57

*Г. А. КОЛОТЕНКО*, канд. техн. наук,

*А. Т. ФИЛАТОВ*, д-р мед. наук, *Т. И. АХМЕДОВ*, канд. мед. наук

## **ВЕКТОРНАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННЫХ И АСИНХРОННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА**

Модель множества синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга можно характеризовать трехмерными координатами кривых поверхностей.

Цель статьи — построение векторной модели потенциалов головного мозга методами биологической и медицинской кибернетики по данным ЭЭС.

Структуры и величины накопленных комбинаторных структур потенциалов головного мозга за ЭЭС выборку скалярны, если определяются только числом. Множества различных синхронных и асинхронных потенциалов, отображающие межструктурные связи или взаимосвязи головного мозга, векторны, если составляющие ее скаляры имеют направление. Так как функциональные состояния организма характеризуются общей направленностью, то различные комбинаторные синхронные и асинхронные потенциалы головного мозга векторны. Такие потенциалы образуют системы.

Длительность систем пространственно-временных связей головного мозга иерархических структур можно описать аналоговыми, импульсными и аналого-импульсными параметрами. Одиночный импульс (солитон) имеет параметры: длительность импульсов  $\tau_n$  на определенном уровне анализа, передний (восходящий) фронт  $\tau_f$  биоимпульса, задний (нисходящий) фронт  $\tau_{cp}$ , максимальную амплитуду  $i_{max}$ , период  $T$ , частоту  $f$  по величине обратную периоду и т. д. Множество непрерывных биоимпульсов головного мозга образуют непрерывный, аналоговый нелинейный процесс. Эквивалентные преобразования с аналоговыми элементами в сочетании с системой параметров множества импульсов формируют аналого-импульсные модели доминантных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга при различных функциональных состояниях, что позволяет их использовать при количественно-дифференцированном анализе в клинике и эксперименте.

Простейшие автоматические преобразования, связанные с суммой  $\tau_n$  за ЭЭС реализации, позволяют оценить определенную сторону межцентральных пространственно-временных отношений, обусловленных целостной деятельностью мозга. Длительность импульсов  $\tau_n$  идентифицирует время существования позиционной биоэлектрической активности целостного мозга. Следовательно, системы пространственно-временных связей головного мозга имеют общую направленность развития во времени и в этом смысле векторны. На определенном амплитудном уровне активности векторные длительности формируются в виде отрезков разной длины, ограниченных друг от друга пространством разрыва. Их можно условно назвать дискретными биоэлектрическими событиями или квантами. Длина вектора такого биоэлектрического кванта  $\vec{\tau}_n$  представляет модуль вектора  $|\vec{\tau}_n|$ , его абсолютную или скалярную величину. Переменные вектора  $|\vec{\tau}_n|$  множества доминантных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга иерархических структур при различных функциональных состояниях однонаправлены, что, в частности, характеризует необратимость биоэлектрических процессов головного мозга во времени.

Если модуль  $|\vec{\tau}_n|$  равен единице измерения, то он равен орту  $\vec{\tau}_n^0$ . Направление векторов  $\vec{\tau}_n$  и  $\vec{\tau}_{cp}$  множества доминантных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга по ходу развития нелинейных биоэлектрических процессов криволинейно. Направление прямого, аппроксимированного векторного луча, направленного от нулевой оси до точки пересечения криволинейного вектора переднего или заднего фронта с амплитудным уровнем, на котором производится кибернетический анализ, идеально. Если начало вектора  $\vec{\tau}_n$  до-

минантной системы пространственно-временных связей головного мозга иерархических структур, отображенного на разных амплитудных уровнях (разница между которыми равна дифференциалу  $ds$ ) так, что начало его совпадает с концом, то вектор этой системы пространственно-временной связи мозга нулевой и имеет в плане векторного исчисления неопределенное направление.

Таким образом, если производить измерения, двигаясь по нелинейной кривой ЭЭГ, то биоэлектрическая активность головного мозга будет характеризоваться аналоговой векторной кривой. Если же оценивать биоэлектрическую активность мозга параметрами  $\vec{\tau}_n$  систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, то эти же процессы будут прерывными, дискретными и тоже векторными.

Векторы  $\vec{\tau}_n$  множества систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга на одном или ряде уровней анализа коллинеарны, параллельны и равнонаправлены. Сумма коллинеарных векторов  $\vec{\tau}_n$  множества доминантных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга при различных функциональных состояниях равна сумме их модулей  $\vec{\tau}_{n_1} + \vec{\tau}_{n_2} + \dots + \vec{\tau}_{n_i} + \dots = |\vec{\tau}_{n_1}| + |\vec{\tau}_{n_2}| + \dots + |\vec{\tau}_{n_i}|$ .

Перемещение коллинеарных векторов  $\vec{\tau}_n$  множества систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга идентичных структур при различных функциональных состояниях не меняет их суммы:

$$\vec{\tau}_{n_1} + \vec{\tau}_{n_2} + \dots + \vec{\tau}_{n_i} + \dots + = + \dots + \vec{\tau}_{n_i} + \dots + \vec{\tau}_{n_i} + \vec{\tau}_{n_2} + \dots$$

Неравенство  $\vec{\tau}_{n_1} \neq \vec{\tau}_{n_2} \neq \dots \neq \vec{\tau}_{n_i} \neq \dots$  множества систем пространственно-временных связей головного мозга может интерпретироваться деформацией  $\vec{\tau}_{n_i}$ , образующейся в результате умножения вектора  $\vec{\tau}_{n_i}$  на скаляр одной полярности для четного числа, только положительной — для нечетного числа. Например, при  $a = -4$ ,  $b = -5$  имеем

$$a(b \vec{\tau}_{n_i}) = (ab) \vec{\tau}_{n_i}; -4 \cdot (-5 \cdot \vec{\tau}_{n_i}) = 20 \cdot \vec{\tau}_{n_i}$$

В таком случае, если  $\vec{\tau}_{n_1} = \vec{\tau}_{n_i}$ , а  $\vec{\tau}_{n_i} = 20 \vec{\tau}_{n_1}$ , то  $\vec{\tau}_{n_2} > \vec{\tau}_{n_1}$ . Длинность вектора  $\vec{\tau}_{n_2}$  системы пространственно-временных связей головного мозга больше вектора  $\vec{\tau}_{n_1}$  в 20 раз. Направление векто-

ров  $\vec{\tau}_{n_1}$  и  $\vec{\tau}_{n_2}$  анализируемых систем пространственно-временных связей головного мозга одинаковое. Отсюда

$$\vec{\tau}_{n_1} \neq a \vec{\tau}_{n_1} \neq b \vec{\tau}_{n_1} \neq c \vec{\tau}_{n_1} \neq \dots,$$

где  $n = a \neq b \neq c \dots$  — скаляры,  $\vec{\tau}_n$  — не нулевой вектор системы пространственно-временных связей головного мозга.

Умножение вектора  $\vec{\tau}_{n_1}$  системы пространственно-временных связей головного мозга на скаляр  $n$  моделирует трансформацию коллинеарного вектора  $\vec{\tau}_{n_1}$  системы пространственно-временных связей головного мозга, развивающейся во времени  $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n$  и образуя векторы  $\vec{\tau}_{n_1}, \vec{\tau}_{n_2}, \dots, \vec{\tau}_{n_i}, \dots, \vec{\tau}_{n_n}$  множества систем пространственно-временных связей головного мозга. Эти векторы равнонаправлены независимо от количества уровней анализа и могут характеризоваться матрицей:

$$\begin{vmatrix} \vec{\tau}_{n_1}^1, & \vec{\tau}_{n_2}^1, & \vec{\tau}_{n_3}^1, & \dots, & \vec{\tau}_{n_i}^1, & \dots, & \vec{\tau}_{n_n}^1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \vec{\tau}_{n_{i_1}}^i, & \vec{\tau}_{n_{i_2}}^i, & \vec{\tau}_{n_{i_3}}^i, & \dots, & \vec{\tau}_{n_{i_i}}^i, & \dots, & \vec{\tau}_{n_{i_n}}^i \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \vec{\tau}_{n_{n_1}}^n, & \vec{\tau}_{n_{n_2}}^n, & \vec{\tau}_{n_{n_3}}^n, & \dots, & \vec{\tau}_{n_{n_i}}^n, & \dots, & \vec{\tau}_{n_{n_n}}^n \end{vmatrix}.$$

Скаляр  $n$  коллинеарных векторов множества систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга называется отношением векторов, так как

$$a = \frac{\vec{a} \vec{\tau}_{n_1}}{\vec{\tau}_{n_1}}; \quad b = \frac{\vec{b} \vec{\tau}_{n_1}}{\vec{\tau}_{n_1}}; \quad c = \frac{\vec{c} \vec{\tau}_{n_1}}{\vec{\tau}_{n_1}}; \quad \dots \quad i = \frac{i \vec{\tau}_{n_1}}{\vec{\tau}_{n_1}}.$$

Кибернетический анализ однонаправленных коллинеарных векторов множества систем пространственно-временных связей головного мозга равносильен параллельному переносу их относительно друг друга на различные уровни биоэлектрической активности головного мозга с соответствующей им деформацией длин  $\vec{\tau}_n$ .

В прямоугольной или декартовой системе координат проекции векторов  $\vec{\tau}_n$  и  $\vec{\tau}_{cn}$  равны:

$$X = X_2 - X_1, \quad Y = Y_2 - Y_1, \quad Z = Z_2 - Z_1;$$

$$X = a_2 - a_1, \quad Y = b_2 - b_1, \quad Z = c_2 - c_1.$$

Векторы  $\vec{\tau}_n, \vec{\tau}_{cn}$  могут быть условно записаны

$$\vec{\tau}_\phi = \vec{\tau}_n = (X_2 - X_1)\vec{i} + (Y_2 - Y_1)\vec{j} + (Z_2 - Z_1)\vec{k};$$

$$\vec{\tau}_{cn} = (a_2 - a_1)\vec{i} + (b_2 - b_1)\vec{j} + (C_2 - C_1)\vec{k},$$

где  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  — орты, единичные векторы систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга иерархических структур, спроектированные на соответствующие оси координат.

Проекции векторов  $\vec{\tau}_{\phi_1}, \vec{\tau}_{\phi_2}, \dots, \vec{\tau}_{\phi_i}, \dots, \vec{\tau}_{\phi_n}$  множества систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга и  $\vec{\tau}_{cn_1}, \vec{\tau}_{cn_2}, \dots, \vec{\tau}_{cn_i}, \dots, \vec{\tau}_{cn_n}$  за ЭЭС реализацию равны соответствующим суммам:

$$\vec{\tau}_{\phi_1} + \vec{\tau}_{\phi_2} + \vec{\tau}_{\phi_3} + \dots + \vec{\tau}_{\phi_i} + \dots + \vec{\tau}_{\phi_n};$$

$$\vec{\tau}_{cn_1} + \vec{\tau}_{cn_2} + \vec{\tau}_{cn_3} + \dots + \vec{\tau}_{cn_i} + \dots + \vec{\tau}_{cn_n}.$$

При сложении векторов  $\vec{\tau}_{\phi_i}, \vec{\tau}_{cn_i}$  систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга одноименные проекции складываются:

$$\begin{aligned} & (\vec{\tau}_{\phi_1} + \vec{\tau}_{\phi_2} + \dots + \vec{\tau}_{\phi_i} + \dots + \vec{\tau}_{\phi_n}) + (\vec{\tau}_{cn_1} + \vec{\tau}_{cn_2} + \dots + \vec{\tau}_{cn_i} + \dots \\ & + \dots + \vec{\tau}_{cn_n}) = (X_1 + X_2 + \dots + X_i + \dots + X_n)\vec{i} + \\ & + (Y_1 + Y_2 + \dots + Y_i + \dots + Y_n)\vec{j} + (Z_1 + Z_2 + \dots + Z_i + \dots + Z_n)\vec{k}. \end{aligned}$$

При дифференциации моделей множества доминантных систем пространственно-временных синхронных связей головного мозга соответствующих функциональных состояний деформации  $\vec{\tau}_\phi$  и  $\vec{\tau}_{cn}$  этих систем могут быть отражены путем умножения соответствующей проекции на скаляр. Тогда при  $n=a, b, C, \dots, i, \dots, m$ :

$$n(\vec{\tau}_{\phi_1} + \vec{\tau}_{\phi_2} + \dots + \vec{\tau}_{\phi_i} + \dots + \vec{\tau}_{\phi_n}) + n(\vec{\tau}_{cn_1} + \vec{\tau}_{cn_2} + \dots + \vec{\tau}_{cn_i} + \dots$$

$$+ \vec{\tau}_{cn_n}) = n[(X_1 + X_2 + \dots + X_i + \dots + X_n)\vec{i} +$$

$$+ (Y_1 + Y_2 + \dots + Y_i + \dots + Y_n)\vec{j} +$$

$$+ (Z_1 + Z_2 + \dots + Z_i + \dots + Z_n)\vec{k}].$$

Для вектора  $\vec{\tau}_{n_i}$  систем пространственно-временных связей головного мозга две компоненты проекции представляют нуль-вектор, так как  $\vec{\tau}_{n_i}$  коллинеарен с временной осью  $OX$ .

Сумма проекций векторов  $\vec{\tau}_{\phi_i}, \vec{\tau}_{n_i}, \vec{\tau}_{сп_i}$  равна времени ЭЭС реализации. Удельный вес соответствующей суммы проекций векторов  $\vec{\tau}_{\phi_i}, \vec{\tau}_{n_i}, \vec{\tau}_{сп_i}$  определяет временную доминантность переменных процессов роста биоэлектрической активности до определенного амплитудного уровня, длительности протекания биоэлектрической активности головного мозга на определенном амплитудном уровне, время спада и нарастания биоэлектрической активности мозга. Если сумма проекции векторов  $\vec{\tau}_{n_i}$  больше суммы

проекции векторов  $\vec{\tau}_{\phi_i}, \vec{\tau}_{сп_i}$ , то на данном уровне биоэлектрической активности относительно устойчивые процессы биоэлектрической активности превалируют над неустойчивыми. Стабильность выше у дифференцируемых систем пространственно-временных связей головного мозга иерархических структур, вероятностно меняющихся согласно изменению функционального состояния.

Векторное произведение  $\vec{\tau}_{n_1}^1, \vec{\tau}_{n_1}^2, \dots, \vec{\tau}_{n_i}^i, \dots, \vec{\tau}_{n_n}^n$  систем пространственно-временных связей головного мозга иерархических уровней анализа равно нулю, так как они коллинеарны

$$[\vec{\tau}_{n_1}^1, \vec{\tau}_{n_1}^2, \dots, \vec{\tau}_{n_i}^i, \dots, \vec{\tau}_{n_n}^n] = 0.$$

Но если подойти в более широком плане анализа, то объемные модели множества систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга могут быть построены при помощи векторного произведения трех векторов, два из которых лежат в метрическом пространстве регистрации  $p$ , третий — перпендикулярен им. Множество криволинейных плоскостей, образующих пучек анализируемых плоскостей, проходящих через зону регистрации, аппроксимированно представляемую точкой  $s_{0_i}$  называется связкой плоскостей множества доминантных систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, а  $s_0$  — центром этой связки. Так как зон регистрации много, следовательно, центров связок также множество. Они замкнуты между собой криволинейными поверхностями  $i$ -го порядка систем пространственно-временных связей головного мозга. Кривизну этих плоскостей определяет вес множества систем пространственно-временных связей головного мозга в центре связки. В первом приближении множество поверхностей пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга может быть представлено системами линейных уравнений, решаемых при помощи определителей и матриц, в которых коэффициентами соответствующих проекций векторов может служить вес, характерный для анализируемого функционального состояния.

Если каждой точке метрического пространства  $p$  головного мозга поставлена в соответствие каждая точка отображения, то имеется тождественное преобразование пространства  $p$ .

При гомоморфном моделировании биоэлектрических явлений головного мозга может наблюдаться сжатие (характеризуемое делением) и расширение (при умножении) биопотенциалов головного мозга в пространстве и времени соответственно функциональным состояниям, что является решающим фактором для объективного дифференцирования и краткосрочного прогнозирования.

Векторы систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, компоненты которых не меняют знаки при инверсии системы координат, называются псевдовекторами или аксиальными векторами систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга. Примером аксиального вектора может служить векторное произведение двух полярных векторов  $\tau_f$  и  $\tau_{cl}$  модельно представляющих поворот системы биоимпульсов в объемном пространстве.

Наличие на поверхности регистрации пульсирующих потенциалов мозга, порожденных, по всей видимости, системой импульсного возбуждения, приводит к объективной необходимости существования квазистационарного биоэлектрического поля, существующего как в объеме головного мозга, так и в его окрестности. Квазистационарное биоэлектрическое поле головного мозга названо так потому, что характеризуется постоянной и импульсирующей, низкочастотной переменной составляющей. Оно аналогово (в этом смысле для него характерна диффузная биоэлектрическая область) и оно дискретно (в этом свете для него приемлема локальность, сконцентрированность биоэлектрических областей). Наличие разности потенциалов между координатами регистрации доказывает формирование объемных биоэлектрических диполей, находящихся в динамике перемещений. Переменная электрическая составляющая головного мозга в окружающей «сжимаемой» среде быстро затухает. Магнитная составляющая этого импульсирующего биоэлектрического поля головного мозга такого малого порядка, что в настоящий момент измерительной техники псевдопарадоксальна.

Используя символическую операцию пространственного дифференцирования

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial X} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial Y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial Z} \vec{k}$$

и зная вектор скорости  $u$  импульсирующего потока биоэлектрической активности головного мозга в одном из множеств вероятных центров системы импульсного возбуждения целостного мозга, можно промоделировать ряд свойств пространственно-временного распределения биоэлектрической активности мозга следующей формулой:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla,$$

где  $\partial/\partial t \neq 0$  — изменение во времени биоэлектрической активности

нестационарного импульсного «погранично»-низкочастотного потока в фиксированной координате пространства, иначе называемой локальной, или местной производной центра активации системы импульсного возбуждения или торможения головного мозга;  $u \cdot \nabla$  — характеризует изменение координат, соответствующее перемещению (конвекции) в поле биоэлектрической активности головного мозга, условно называемое конвективной производной.

Если  $\partial/\partial t$  характеризует нестационарность квазистационарного биоэлектрического поля головного мозга в координируемом пространстве среды, конвективная производная определяет пространственную неоднородность биоэлектрического поля в фиксируемый

момент времени  $t$ . Тогда  $\overline{\partial v/\partial t}$  характеризует локальное ускорение,

$k_n = (\overline{v \cdot \nabla})v$  — параметр конвективного ускорения биоэлектрического поля головного мозга в одном из множеств вероятностно-активированных зон или доминантных областей зависимых от пространственно-временного распределения системы импульсного возбуждения целостного мозга. Ускорение  $k_n = 0$  биоэлектрических потоков неоднородного квазистационарного поля равно нулю в предельном случае. В указанном случае по конвективной составляющей биоэлектрическое поле целостного мозга проявляется дискретно. Для такой модели головного мозга характерно диффундирование биоэлектрического поля. «Рассеивание» в пространстве силовых линий биоэлектрического поля целостного мозга недопустимо смешивать с диффундированием заряженных частиц. «Соприкосновение» понятий происходит вследствие математической сложности отображаемого материала.

Как видно, идентификация множества иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга при помощи элементов векторного исчисления позволяет углубить представление о доминантности системы импульсного возбуждения целостного мозга.

Если учитывать доминанты множества систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга, например операторов АСУ, обусловленные положительными и отрицательными эмоциями, то их можно разграничить на положительные и отрицательные. Последние векторно «иррадируют», взаимно затормаживают друг друга, одна или несколько подсистем связей которых переходит в сферу маловероятных скрытых доминант, другая (или несколько других), в силу сложившихся благоприятных облегченных условий, становится (либо сохраняется) вероятной, очевидной доминантой систем пространственно-временных связей головного мозга. Исходя из основополагающих положений школы И. П. Павлова, можно утверждать, что в зависимости «от силовых отношений» двухи более доминантных состояний систем пространственно-временных связей пусковое целенаправленное возмущение может перехватываться то одним, то другим из них, то вариантами усиливающихся импульсных возбуждений, распространяясь в пространстве и определяя тем самым структуру до-

минантных систем пространственно-временных связей головного мозга в целом.

Если подходить при проектировании бионического устройства, функционирующего по принципу доминант в плоскости двоичного кода, когда логический нуль характеризует энергетическое обесточивание, значит не учитывать механизм взаимодействия системы электротонического и импульсного возбуждения и иерархии сетей прямых и обратных связей. Предлагаемая модель приводит к необходимости разработки электронных схем, когда логические «1» и «0» — активны, коммутируемы. Тогда обесточивание будет соответствовать третьему искусственному состоянию. Саморегуляция бионических устройств должна производиться как по постоянной, так и по переменной составляющим электронных схем. Только такое моделирование составляет обязательный и плодотворный этап изучения функциональных проявлений организма. Давая в руки экспериментатора возможность управления физиологическими явлениями и произвольного их комбинирования, экспериментальные модели открывают широчайшие горизонты по вскрытию природы функций»\*.

*Поступила в редколлегию 15.02.87*

УДК 519.584

*А. Р. БЕЛКИН, канд. физ.-мат. наук*

### **ОЦЕНКА ХАРАКТЕРНОСТИ ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ И ДИАГНОСТИКИ**

При решении конкретных задач диагностики, классификации и принятия решений нередко возникает необходимость в количественной оценке степени характерности тех или иных симптомов, признаков, свойств для объектов, относящихся к определенному классу. Для получения подобных оценок обычно используются экспертные методы, однако ситуация осложняется тем, что эксперт, как правило, не может дать адекватной количественной оценки в достаточно детализированной шкале. В качестве паллиатива нередко используются балльные оценки; здесь же мы рассмотрим несколько иной подход, предполагающий опосредованное, косвенное получение искомым оценок характерности.

Нами предложена многоэтапная процедура сбора и последующей обработки экспертной информации ВСПАШКА (выявление структуры предпочтений, анализ и шкалирование альтернатив), не требующая от эксперта детальных ответов и предусматривающая лишь сравнение достаточно однотипных альтернатив с последующим сведением получаемой информации воедино. Основные этапы этой процедуры имеют следующий вид: 1) сбор экспертной информации; 2) построение и первичная обработка ориентированного графа превосходства; 3) построение транзитивного замыкания орграфа превосходства и устранение слабых противоречий (коллизий); 4) учет и обработка графа безразличия; 5) окончательное вычисление оценок (шкалирование).

Предлагаемая процедура, на наш взгляд, может оказаться полезной в тех случаях, когда требуемые оценки характерности в дальнейшем предполагается

\* Анохин П. К. Внутреннее торможение как проблема физиологии. М., 1958. С. 347.

использовать в качестве значений функций принадлежности, вводимых в русло идей и аппарата теории нечетких множеств [1]. Она опирается на последовательное использование нечетких квантификаторов, для работы с которыми предлагаются достаточно естественные правила. Рассмотрим подробнее основные этапы процедуры ВСПАШКА.

**Постановка задачи и сбор экспертной информации.** Предположим, что объекты из рассматриваемого универсума могут характеризоваться  $m$  признаками  $g_1, \dots, g_m$ . Полагая, что наличию  $l$  классов объектов  $Q_1, \dots, Q_l$ , введем в рассмотрение понятие степени характерности признака  $g_i$  для класса  $Q_j$ , обозначив ее  $h_{ij} \in [0; 1]$ , и зададимся целью определения полной матрицы характерностей  $H = h_{ij}^{m \times l}$ . Поскольку непосредственное получение матрицы  $H$  от эксперта представляется нереальным, для ее построения предлагается косвенная процедура, при реализации которой эксперт сравнивает между собой только однотипные альтернативы.

Таблица 1

**Пример выполнения шкалирующей таблицы**

Часть А. Сравнение признаков

№	Название класса	Ранжировка признаков
1		$Q_1: g_2 \gg g_2 \sim g_4 \sim g_3 > g_5$
2		
...	...	...
$l$		

Часть Б. Сравнение классов

№	Название признака	Ранжировка классов
1		
2		
...	...	...
$m$		

Эксперту предлагается заполнить специальную шкалирующую таблицу, состоящую из двух частей: А и Б (табл. 1). При заполнении части А эксперт рассматривает по отдельности каждый класс  $Q_j$  и последовательно выделяет вначале наиболее характерный для объектов этого класса признак, затем — следующий по характерности и т. д. Ранжировка признаков по характерности их для класса  $Q_j$ , получающаяся таким образом, заносится в  $j$ -ю строку части А, причем эксперту, кроме того, предлагается грубо оценить разницу между соседними ее членами, пользуясь знаками  $\gg, >, \sim$  и имея в виду нечеткие квантификаторы «много», «умеренно» и «примерно одинаково». Таким образом, заполненная  $j$ -я строка части А приобретает следующий вид:

$$Q_j: g_{i_1} \circ g_{i_2} \circ \dots \circ g_{i_m}; \quad j = \overline{1, l}, \quad (1)$$

где  $\circ$  — знак из множества  $\{\gg, >, \sim\}$ .

Заполнение части Б протекает аналогично. Рассматривая ее  $i$ -ю строку, эксперт фиксирует признак  $g_i$  и выделяет тот класс, который при наличии этого признака представляется ему наиболее вероятным, затем — следующий класс и т. д., вновь оценивая разницу между соседними членами ранжировки. В итоге  $i$ -я строка части Б приобретает вид

$$g_i: Q_{j_1} \circ Q_{j_2} \circ \dots \circ Q_{j_l}; \quad i = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Еще раз подчеркнем, что эксперту, таким образом, не приходится сравнивать между собой произвольные альтернативы (т. е. величины вида  $ht_{1j_1}$  и  $ht_{2j_2}$ ). Сравнивается между собой либо характерность различных признаков для одного и того же класса (в части А), либо характерность одного и того же признака для различных классов (в части Б). Такая организация экспертизы, вкупе с оценкой различия между соседними членами ранжировок в предельно грубой шкале, позволяет надеяться на достаточную адекватность получаемой экспертной информации.

*Первичная обработка экспертной информации.* Полученная шкалирующая таблица, содержащая  $l+m$  ранжировок, служит базой для построения взвешенной структуры предпочтения/безразличия, представляемой в виде двух графов: орграфа превосходства  $G=(V, A)$  и графа безразличия  $\Gamma(V, U)$ , в которых  $|V|=ml$  и произвольная вершина  $s \in V$  отвечает единственной паре  $(i_s, j_s)$ ;  $i_s \leq m$ ;  $j_s \leq l$ .

На множестве вершин (и соответствующих пар) введем обычное отношение-предшествование, полагая, что  $s$  предшествует  $t$ , если  $i_s = i_t$  и в  $i_s$ -й строке части Б класс  $Q_{i_s}$  предшествует  $Q_{i_t}$  либо  $j_s = j_t$  и в  $j_s$ -й строке части А признак  $g_{i_s}$  предшествует  $g_{i_t}$ .

В случае, когда соответствующие члены ранжировок оказываются рядом, имеет смысл говорить о непосредственном предшествовании.

В графе  $\Gamma$  вершины  $s$  и  $t$  соединяются ребром, если одна из них непосредственно предшествует другой и соответствующие члены ранжировок разделены знаком  $\sim$ . В орграфе  $G$  дуга  $(s, t)$  проводится, если  $s$  предшествует  $t$ , причем соответствующие члены ранжировки разделены ровно одним знаком  $\gg$  или  $>$  (и, возможно, несколькими знаками  $\sim$ ). В случае знака  $\gg$  дуга  $(s, t)$  взвешивается квантификатором  $M$  (много), а в случае  $>$  — квантификатором  $У$  (умеренно). Фрагменты графов  $G$  и  $\Gamma$ , получающиеся из табл. 1 заполненной строки, показаны на рис. 1.

Отношение превосходства, задаваемое построенным графом  $G$ , предполагается транзитивным, так что этот орграф не должен содержать контуров. Если же контур в  $G$  есть, имеет место сильное противоречие (антиномия), устранить которое можно лишь в диалоге с экспертом.

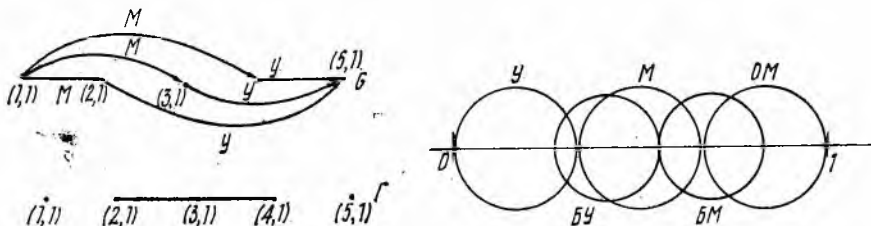


Рис. 1. Фрагменты графов превосходства и безразличия

Рис. 2. Взаимосвязь между введенными нечеткими квантификаторами

Целью такого диалога является некоторое изменение структуры предпочтений, приводящее к разрыву всех контуров, достигаемое обычно заменой некоторых знаков  $>$  на  $\sim$ . При необходимости эксперту может быть выдано минимальное по включению подмножество дуг, удаление которых из графа  $G$  (с введением соответствующих ребер в граф  $\Gamma$ ) приводит к разрыву всех контуров, отыскиваемое стандартными методами (см., например, [2]).

После устранения контуров вершины могут быть однозначно разнесены по уровням иерархии:

- 1 уровень — вершины с нулевой полустепенью захода (антитипикки);
- 2 уровень — вершины, доминируемые лишь вершинами 1-го уровня;

$k$ -й уровень — вершины, доминируемые лишь вершинами 1, 2, ...,  $(k-1)$ -го уровней, и т. д.

В оргграф  $G$  добавляется также вершина  $0^-$  (вход), из которой проводятся дуги во все антитупики, и вершина  $0^+$  (выход), куда проводятся дуги из всех тупиков. Веса этих дуг принимаются равными  $У$ .

*Построение транзитивного замыкания графа превосходства.* Дальнейшая обработка имеющейся информации предусматривает построение взвешенного транзитивного замыкания оргграфа  $G$  с целью выявления и устранения слабых противоречий (коллизий). Такая коллизия имеет место, если в графе  $G$  из вершины  $s$  в вершину  $t$  ведут два пути, причем суммарный вес дуг вдоль одного пути значительно выше, чем вдоль другого. Устранение такой коллизии должно, очевидно, включать в себя изменение весов каких-либо дуг.

Для формализации понятия «суммарный вес» введем еще три дополнительных (производных) квантификатора: ОМ (очень много), БМ (более, чем много) и БУ (более, чем умеренно), определив на множестве квантификаторов следующие правила сложения (сходные с правилами из [1]):

$$\begin{aligned} \text{ОМ} + \text{А} &= \text{БМ} + \text{БМ} = \text{БМ} + \text{М} = \text{М} + \text{М} = \text{ОМ} \\ &(\text{А} - \text{произвольный квантификатор}); \\ \text{БМ} + \text{У} &= \text{БМ} + \text{БУ} = \text{М} + \text{У} = \text{М} + \text{БУ} = \text{БМ}; \\ \text{У} + \text{У} &= \text{БУ} + \text{У} = \text{БУ}. \end{aligned}$$

Т а б л и ц а 2

Способы разрешения коллизий

Х а р а к т е р и с т и к а		Способ устранения коллизий
дуги ( $s, t$ )	пути $s \rightarrow r \rightarrow t$	
У, М	БУ, БМ, ОМ	Заменить вес и индекс, дугу исключить из числа базовых и считать триангулирующей, запомнить соответствующий путь
БУ	БУ с большим индексом	Заменить индекс, запомнить новый путь
	БМ, ОМ с меньшим индексом	Заменить вес и индекс, запомнить новый путь, а в старом усилить дугу
	ОМ с большим или равным индексом	То же, но усилить две дуги
БМ	БУ с меньшим или равным индексом	Усилить в пути $s \rightarrow r \rightarrow t$ одну дугу
	БУ с большим индексом	То же, запомнить этот путь и заменить индекс
	БМ с большим индексом	Заменить индекс, запомнить новый путь
	ОМ	Заменить вес и индекс, запомнить новый путь
ОМ	БУ с меньшим или равным индексом	Усилить в пути $s \rightarrow r \rightarrow t$ две дуги
	БУ с большим индексом	Усилить в пути $s \rightarrow r \rightarrow t$ одну дугу
	ОМ с большим инд.	Заменить индекс, запомнить путь

Взаимосвязь между введенными квантификаторами схематически проиллюстрирована на рис. 2. Противоречие (коллизия) налично, если суммарный вес дуг вдоль одного пути значительно отличается от веса вдоль другого пути, т. е. соответствующие нечеткие квантификаторы не пересекаются.

При построении транзитивного замыкания (ТЗ)  $G^*$  все дуги его подразделяются на базовые (имевшиеся в  $G$ ) и триангулирующие. Помимо веса, вводится индекс дуги, указывающий на длину пути из базовых дуг, который она закорачивает; при этом суммарный индекс пути  $s \rightarrow r \rightarrow t$ , очевидно, равен сумме индексов дуг  $(s, r)$  и  $(r, t)$ . В ходе построения ТЗ  $G^*$  для каждой пары  $(s, t)$  ищется промежуточная вершина  $r$ :  $(s, r) \in A$ ;  $(r, t) \in A$ . Если при этом  $(s, t) \notin A$ , то дуга  $(s, t)$  проводится и ей присваивается соответствующий вес и индекс; если же эта дуга в  $A$  уже была, но характеристики ее иные, чем у пути  $s \rightarrow r \rightarrow t$ , то имеет место коллизия. Способы ее разрешения сведены в табл. 2.

Упомянутое в таблице усиление состоит в том, что вес одной из базовых дуг изменяется с  $U$  на  $M$  (такое действие вызвано предположением о том, что эксперт может лишь недооценить различие между соседними членами ранжировки, но не преувеличить его, так как если эта разница значительна, то он ее легко отслеживает). Было бы весьма желательным так выбрать минимальное подмножество усиливаемых дуг, чтобы разом разрешить все коллизии; однако такая задача вряд ли может быть эффективно решена, поэтому предлагается следующая эвристическая процедура, хорошо совместимая с просмотром графа сверху вниз: в первую очередь усиливаются, по возможности, дуги вида  $(0^-, i)$ , в противном случае выбирается нижняя из дуг с весом  $U$ .

Практически построение ТЗ  $G^*$  может быть реализовано при посредстве следующей схемы, просматривающей граф сверху вниз:

1. Выбрать вершину  $t$  на уровне с номером  $p \geq 2$ .
2. Выбрать вершину  $s$  на уровне с номером  $q \leq p - 2$ .
3. Выбрать вершину  $r$  на уровне с промежуточным номером  $w$ .
4. Сравнить дугу  $(s, t)$  и путь  $s \rightarrow r \rightarrow t$  (если он существует) и произвести вышеописанные действия. Если производилось усиление, то положить  $p$  равным номеру уровня, на котором находился конец усиливаемой дуги, и перейти к 2.
5. Шаги 3—4 повторять для всех вершин  $r$  данного уровня  $w$ .
6. Шаги 3—5 повторять для всех промежуточных уровней  $w = \overline{p+1, q-1}$ .
7. Шаги 2—6 повторять для всех вершин  $s$  данного уровня  $q$ .
8. Шаги 2—7 повторять для всех уровней  $q = 0, p - 2$ .
9. Шаги 1—8 повторять для всех вершин  $t$  данного уровня  $p$ .
10. Шаги 1—9 повторять для всех уровней  $p \geq 2$ .

Разумеется, приведенная схема является ориентировочной и не претендует на оптимальность просмотра.

**Учет графа безразличия  $\Gamma$ .** На очередном этапе обработки информации по отношению ТЗ  $G^*$  сравнивается с имеющимся графом безразличия  $\Gamma$  с целью дополнительного выявления и устранения коллизий. Если ребро  $(s, t) \in \Gamma$ , но  $G^*$  имеется дуга  $(s, t)$  с любым весом, то это ребро из  $\Gamma$  исключается. Более того, если  $(s, t) \in G^*$ , то следует поискать вершину  $r$  такую, что  $(r, s) \in G^*$  и  $(r, t) \in G^*$  (или  $(s, r) \in G^*$  и  $(t, r) \in G^*$ ), и, если такая вершина найдется, сравнить веса этих дуг. Ребро  $(s, t) \in \Gamma$  следует из  $\Gamma$  удалить, если веса этих дуг слишком различны: одна из дуг имеет вес  $U$ , а вторая — БУ (с значительным индексом), М, БМ или ОМ; одна из этих дуг имеет вес БУ, а вторая — БМ или ОМ.

После произведенной редукции графа  $\Gamma$  строится его замыкание  $G^*$ , однако отношение безразличия полагается лишь ограниченно транзитивным: вводится отношение «близко» ( $\approx$ ) и предполагается, что  $s \approx t$ , если в  $\Gamma$  существует цепь из  $s$  в  $t$  длиной не более некоторой небольшой константы  $d$ . Если  $s \approx t$  (т. е.  $(s, t) \in \Gamma^*$ ), то связь между  $s$  и  $t$  в  $\Gamma$  надо разорвать в следующих случаях: в  $G^*$  есть дуга  $(s, t)$  с большим весом (ОМ, БМ, М или БУ с значительным индексом); нашлась вершина  $r$  такая, что в  $G^*$  одновременно входят обе дуги  $(s, r)$  и  $(t, r)$  (или  $(r, s)$  и  $(r, t)$ ), причем разница в их весах очень велика (одна имеет вес БУ, а другая — ОМ или одна имеет вес  $U$ , а другая — ОМ или БМ).

Построение замыкания  $\Gamma^*$  (и, соответственно, отношения  $\approx$ ) требует введения матрицы смежности  $\Gamma$  в степень  $d$ . Поиск минимального подмножества дуг, удаление которых разрывает все подлежащие разрыву цепи, — стандартная оптимизационная задача.

*Собственно шкалирование.* На завершающем этапе производится поиск матрицы  $H$ , в некотором смысле наилучшим образом отвечающей построенной и откорректированной структуре предпочтения/безразличия. Делается естественное предположение о наличии порогов различения  $\alpha$ ,  $\beta$ , таких, что базовой дуге с весом  $M$  отвечает неравенство вида  $h_{i_s i_s} - h_{i_t i_t} \leq \beta$ , а ребру  $(s, t) \in \Gamma$  — неравенство вида  $|h_{i_s i_s} - h_{i_t i_t}| \leq \alpha$ .

Рассмотрим произвольную ненулевую вершину  $s$  и дуги  $(0^-, s)$  и  $(s, 0^+)$ . Пусть дуга  $(0^-, s)$  триангулирует в  $G^*$  некоторый путь, в котором есть  $k_s$  дуг с весом  $U$  и  $w_s$  дуг с весом  $M$ , тогда можно указать верхнюю оценку

$$h_{i_s i_s} \leq 1 - k_s \alpha - w_s \beta \stackrel{\Delta}{=} \Phi_s. \quad (3)$$

Аналогично, рассмотрев путь, триангулируемый дугой  $(s, 0^+)$  и содержащий  $u_s$  дуг с весом  $U$  и  $v_s$  дуг с весом  $M$ , можно указать и нижнюю оценку

$$h_{i_s i_s} \geq u_s \alpha + v_s \beta \stackrel{\Delta}{=} \mu_s. \quad (4)$$

Объединяя (3) и (4), можно получить очевидное условие совместности

$$(u_s + k_s) \alpha + (v_s + w_s) \beta \leq 1, \quad (5)$$

а выписав неравенства вида (5) для каждой вершины  $s$ , придём к системе неравенств относительно  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\begin{cases} \forall_s a_s \alpha + b_s \beta \leq 1, \\ \beta \geq \alpha \geq 0, \end{cases} \quad (6)$$

заведомо совместной, ибо все  $a_s$  и  $b_s$  целочисленны и неотрицательны. Для выбора конкретного значения  $\alpha$  и  $\beta$  дополнительно может быть наложено какое-либо экстремальное условие, например,

$$\alpha + \beta \rightarrow \max \quad (7)$$

или условие «максимального сужения»

$$\sum_s (\Phi_s - \varphi_s) \rightarrow \min,$$

переходящее в  $\sum_s (1 - a_s \alpha - b_s \beta) \rightarrow \min$ , т. е. в

$$\sum_s (a_s \alpha + b_s \beta) \equiv a \alpha + b \beta \rightarrow \max. \quad (8)$$

При добавлении к (6) условий (7), (8) или им подобных возникает простая задача линейного программирования.

В принципе, систему (6) можно и усилить. Сформируем частично ориентированный граф  $D$  с множеством вершин  $V \cup \{0^-, 0^+\}$ , проводя в нем дугу  $(s, t)$ , если  $(s, t) \in G$ , с весом  $U$ , или ребро  $(s, t)$ , если  $(s, t) \in \Gamma$ . В построенном графе поищем все частично ориентированные пути из  $0^-$  в  $0^+$ . Пусть произвольный такой путь  $p$  содержит  $c_p$  дуг и  $d_p$  ребер, тогда одновременно верно

$$\begin{cases} c_p \alpha - d_p \beta \leq 1, \\ c_p \beta + d_p \alpha > 1. \end{cases} \quad (9)$$

Выписав все неравенства вида (9), их можно добавить к (6), однако гарантировать совместность полученной системы уже не удастся.

После определения значений порогов в качестве нулевой итерации можно выбрать

$$h_{i_s i_s} = \frac{v(0^-, s) \Phi_s + v(s, 0^+ \varphi_s)}{v(0^-, s) + v(s, 0^+)}, \quad (10)$$

где  $v(0^-, s)$  и  $v(s, 0^+)$  — индексы дуг  $(0^-, s)$  и  $(s, 0^+)$  соответственно. При необходимости полученные значения можно уточнить итерационно, полагая, что если для дуги  $(s, t)$  или ребра  $(s, t) \in \Gamma$  соответствующее неравенство не выполняется, то следует несколько сблизить или раздвинуть значения  $h_{s_j s}$  и  $h_{i_j t}$ . Такие итерации выполняются до тех пор, пока это необходимо или возможно.

Целью настоящей работы было построение достаточно разумной шкалирующей процедуры, не предъявляющей чрезмерно высоких требований к эксперту и обладающей определенными возможностями коррекции экспертной информации, выраженной на достаточно неформальном, вербализованном уровне. В качестве желательной дополнительной возможности эксперту следует разрешить указывать на несовместность какого-либо признака с тем или иным классом (при этом заведомо  $h_{ij} = 0$ ) или, напротив, на их абсолютную совместность (при этом  $h_{ij} = 1$ ), помечая соответствующим образом нужные члены ранжировок. Описанная процедура легко может быть адаптирована и для таких дополнительных условий.

Предложенная нами шкалирующая процедура ВСПАШКА была включена в качестве составной части в экспертно-диагностическую систему НА СРЭДДИН [3], предназначенную для решения задач медицинской дифференциальной диагностики, и апробирована в задачах определения характерности симптомов для того или иного заболевания.

**Список литературы:** 1. *Нечеткие множества в задачах управления и искусственного интеллекта*/Под ред. Д. А. Поспелова. М., 1986. 312 с. 2. *Белкин А. Р.* Приближенная триангуляция матриц в задачах ранжирования и обработки межотраслевого баланса//Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1981. № 1. С. 26—31. 3. *Белкин А. Р., Шулов С. И.* Интерактивная модель нечеткой диагностики//Методы мат. моделирования и обработки информации. М., 1987. С. 78—83.

Поступила в редколлегию 13.09.88

УДК 517.512.2:519.24:534

Е. М. ГУСЯТИН, канд. техн. наук

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ЗАДАНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Многие задачи управления динамическими процессами, такими, как воспроизведение случайных вибраций при стендовых испытаниях на надежность, распределение текущих сред с помощью инженерных сетей, формирование звуков и слов заданной тембровой окраски и другие требуют построения математической модели динамической системы. При этом модель должна быть просто контролируемой, быстро перестраиваемой и по возможности максимально приближенной к реальной системе.

Рассмотрим моделирование динамической системы по заданной частотной характеристике. Так как частотная характеристика реальной системы определяется путем статистической обработки результатов измерения, будем считать ее заданной таблицно

$$W(i\omega_k) = P(\omega_k) + iQ(\omega_k), \quad k = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Моделирование производится на основе разложения функции

$$f(t) = e^{at} w(t)$$

в пространстве  $L^2$  со скалярным произведением

$$(f, g) = \int_0^{\infty} e^{-at} f(t) g(t) dt$$

в ряд по биортонормированной системе (БНС) функций  $\{\sigma_h, \psi_k\}$ , где  $\omega(t)$  — импульсная переходная функция (н. п. ф.) системы, соответствующая частотной характеристике (1), а выбирается таким образом, чтобы  $f(t) \in L^2$ ;  $\{\sigma_h, \psi_k\}$  строится в  $L^2$  биортонормализацией линейно независимых полных систем  $\{g_k\}$  и  $\{e_k\} \subset L^2$  и имеет следующий вид:

$$\sigma_k(t) = \sum_{j=1}^k C_{kj} e_j(t), \quad \psi_k(t) = \sum_{j=1}^k B_{kj} g_j(t), \quad k = 1, 2, \dots$$

Коэффициенты  $C_{kj}$ ,  $B_{kj}$  определяются из рекуррентных соотношений [1]

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_k(t) &= e_k(t) - \sum_{j=1}^{k-1} (e_k, \psi_j) \sigma_j(t); \\ \hat{\psi}_k(t) &= g_k(t) - \sum_{j=1}^{k-1} (g_k, \sigma_j) \psi_j(t); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\sigma_k(t) = \frac{\hat{\sigma}_k(t)}{(\hat{\sigma}_{ki} \hat{\psi}_k)^{1/2}}, \quad \psi_k(t) = \frac{\hat{\psi}_k(t)}{(\hat{\sigma}_k \hat{\psi}_k)^{1/2}}, \quad k = 2, 3, \dots$$

при начальных условиях

$$\hat{\sigma}_1(t) = e_1(t), \quad \hat{\psi}_1(t) = g_1(t).$$

Положительность скалярного произведения  $(\hat{\sigma}_k, \hat{\psi}_k)$  достигается выбором у соответствующего элемента  $e_k(t)$  такого знака, чтобы выполнялось неравенство  $(e_k, \hat{\psi}_k) > 0$ .

В качестве последовательности  $\{e_k\}$  выберем систему

$$\cos \omega_1 t, \sin \omega_1 t, \dots, \cos \omega_N t, \sin \omega_N t, \dots$$

или

$$e_k(t) = \begin{cases} \cos \omega_\nu t, & k = 2\nu - 1, \\ \sin \omega_\nu t, & k = 2\nu, \end{cases} \quad (3)$$

а  $\{g_k\}$  зададим следующим образом:

$$g_k(t) = \begin{cases} v(t) \cos \omega_\nu t, & k = 2\nu - 1, \\ v(t) \sin \omega_\nu t, & k = 2\nu. \end{cases} \quad (4)$$

Такой выбор  $L^2$ ,  $\{e_k\}$  и  $\{g_k\}$  позволяет использовать заданные значения  $W(i\omega_k)$  для моделирования динамической системы.

Действительно, частичная сумма разложения  $f(t)$  по БНС  $\{\sigma_k, \psi_k\}$  запишется, как

$$f_n(t) = \sum_{k=1}^n \zeta_k \psi_k(t),$$

функция  $\omega(t)$  будет аппроксимироваться суммой

$$\omega_n(t) = e^{-at} \sum_{k=1}^n \zeta_k \psi_k(t); \quad (5)$$

$$\zeta_k = (f, \sigma_k) = \sum_{j=1}^k C_{kj} (f, e_j), \quad (6)$$

где, учитывая (1),

$$(f, e_j) = \frac{P(\omega_j)}{Q(\omega_j)}.$$

Таким образом,

$$w_n(t) = e^{-\alpha t} \sum_{k=2}^n d_k g_k(t), \quad (7)$$

$$d_k = \sum_{j=1}^n \zeta_j B_{jk}. \quad (8)$$

Выражение (7) можно интерпретировать как параллельное соединение с общим входом линейных систем с и. п. ф.  $h_k(t) = d_k e^{-\alpha t} g_k(t)$ , вид которой определяется функцией  $w(t)$ ,  $\omega_k$  задает частотный диапазон ее действия, а  $d_k$ , как это видно из (6), (8), зависит от заданных значений  $W(j\omega_k)$ .

Выберем  $v_k(t)$  следующим образом:

$$v_k(t) = e^{-\alpha_k t}, \quad t > 0.$$

Тогда, применив к (7) преобразование Фурье, получим, что в частотной области заданная функция  $W(i\omega_k)$  интерполируется выражением

$$W_n(i\omega) = \sum_{v=1}^{n/2} H_v(i\omega), \quad n/2 = N;$$

$$H_v(i\omega) = \frac{d_{2v-1}(\alpha_v + i\omega) + d_{2v}\omega_v}{(\alpha_v + i\omega)^2 + \omega_v^2}. \quad (9)$$

Точками интерполяции являются  $\omega_k$ , так как выполняются соотношения

$$W_n(i\omega_k) = W(i\omega_k), \quad k = \overline{1, N}. \quad (10)$$

Выбор модели в виде (9) позволяет оперативно изменять частотную характеристику  $W_n(i\omega)$ , подставляя в соотношения (6), (8) текущие значения частотной характеристики реальной системы. Контроль и при необходимости коррекция осуществляется по спектральной плотности выходного сигнала в выбранных точках частотного диапазона на основании интерполирующего свойства (10).

Значения параметров  $\alpha_1, \omega_1, \dots, \alpha_N, \omega_N$ , задающие оптимальное моделирование динамической системы (1), определяются при минимизации функционала

$$\delta = \|f - f_n\|^2. \quad (11)$$

Оценкой для (11) служит выражение

$$\|f - f_n\| \leq \|f - \bar{f}_n\| + \|f_n - \bar{f}_n\|, \quad (12)$$

где

$$\bar{f}_n(t) = \sum_{k=1}^n \lambda_k \varphi_k(t), \quad \lambda_k = (f, \varphi_k)$$

является разложением  $f(t)$  по ортогональной системе  $\{\varphi_k\}$

$$\varphi_k(t) = \sum_{j=1}^k D_{kj} g_j(t),$$

построенной в  $L^2$  ортогонализацией последовательности  $\{g_k\}$ .

Учитывая, что  $\bar{f}_n(t)$  можно представить единственным образом

$$\bar{f}_n(t) = \sum_{k=1}^n \eta_k \varphi_k(t),$$

$$\eta_k = (f_n, \varphi_k) = \sum_{j=k}^n \zeta_j (\psi_j, \psi_k),$$

перепишем (12) в виде

$$\|f - f_n\| \leq \sqrt{\|f\|^2 - \sum_{k=1}^n \gamma_k^2} + \sqrt{\sum_{k=1}^n (\gamma_k - \eta_k)^2}. \quad (13)$$

Оценка (13) позволяет в качестве функции цели выбрать следующий критерий:

$$\Delta = \max \sum_{k=1}^n \gamma_k^2. \quad (14)$$

Запишем  $\{\varphi_k\}$  в матричной форме

$$\varphi(t) = D_g(t),$$

где

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & \dots & 0 \\ D_{21} & D_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ D_{n1} & D_{n2} & \dots & D_{nn} \end{bmatrix} - \text{матрица коэффициентов,}$$

а

$$g(t) = \begin{bmatrix} g_1(t) \\ \dots \\ g_n(t) \end{bmatrix} - \text{вектор элементов } \{g_k\}.$$

Условие ортогональности в матричной форме имеет вид

$$(\varphi, \varphi^*) = A\Gamma = I, \quad (15)$$

где  $A = DD^*$ ,  $\Gamma$  — матрица Грама ОНС  $\{\varphi_k\}$ .

Функция цели (14) запишется следующим образом

$$\Delta = \chi^* \chi = s^* A s, \quad \text{где } \chi = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \dots \\ \gamma_n \end{bmatrix}, \quad s = \begin{bmatrix} (f, g_1) \\ \dots \\ (f, g_n) \end{bmatrix}.$$

Тогда задача сводится к определению максимального значения положительно определенной квадратичной формы

$$\Delta = s^* \Gamma^{-1} s \quad (16)$$

при линейных ограничениях (15).

Учитывая соотношение для производной обратной матрицы

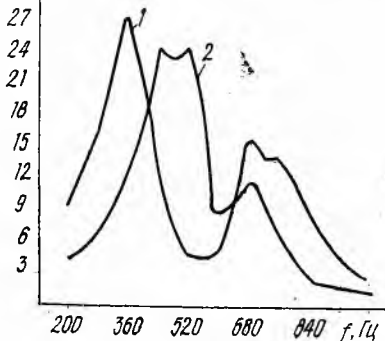
$$(\Gamma^{-1})' = -\Gamma^{-1} \Gamma' \Gamma,$$

получим выражение для производной функции (16)

$$\Delta'_{p_k} = (s^*)'_{p_k} \Gamma^{-1} s + s^* \Gamma^{-1} s'_{p_k} - s^* \Gamma^{-1} \Gamma'_{p_k} s, \quad (17)$$

где  $p_k$  принадлежит множеству параметров  $\alpha_1, \omega_1, \dots, \alpha_N, \omega_N$ .

$S_1, S_2, \text{ дБ}$



Формула (17) дает возможность использовать для определения максимума критерия (14) градиентные методы [2].

Неравенство (13) является оценкой точности моделирования.

В качестве примера рассмотрим расчет коэффициентов математической модели (9) формирования звуков  $i$  и  $aw$  по заданным звуковым спектрам  $S_1(\omega)$  (непрерывная линия) и  $S_2(\omega)$  (пунктирная линия)

Расчет коэффициентов математической модели (9) формирования звуков  $i$  и  $aw$  по  $S_1(\omega), S_2(\omega)$

(рисунок) в частотном диапазоне 200, 1000 Гц [3]. При условии, что на систему (9) действует белый шум, амплитудно-частотной характеристикой системы будет

$$A(\omega) = \sqrt{S(\omega)}.$$

Тембровая окраска звука задается фазочастотной характеристикой голосового тракта, которую выберем в виде

$$\theta(\omega) = 2\pi \left( \frac{\omega_H}{\omega_H - \omega_B} + \frac{\omega}{\omega_B - \omega_H} \right),$$

где  $\omega_H = 200$ ,  $\omega_B = 1000$ .

Таким образом, заданная  $W(i\omega)$  имеет вид

$$W(i\omega) = A(\omega)e^{i\theta(\omega)} = \sqrt{S(\omega)} \cos \theta(\omega) + i\sqrt{S(\omega)} \sin \theta(\omega).$$

Выбор  $\theta(\omega)$  в другом виде изменит тембровую окраску, но спектр звука останется неизменным.

Для оперативного изменения параметров системы выберем  $v_k(t) = -e^{-\beta t}$ , а в качестве  $\omega_k$  — 10 равноотстоящих точек частотного диапазона,  $\beta = 1$ .

По соотношениям (2), (3), (4) с помощью программ, написанных на языке Фортран, рассчитаем коэффициенты БНС функций.

Значение параметров  $d_k$

$d$	$i$	$aw$	$d$	$i$	$aw$
$d_1$	0,111	0,075	$d_{11}$	0,001	0,002
$d_2$	0,063	0,042	$d_{12}$	-0,03	-0,04
$d_3$	-0,045	-0,03	$d_{13}$	0,046	0,04
$d_4$	-0,108	-0,072	$d_{14}$	0,007	0,006
$d_5$	0,113	0,078	$d_{15}$	-0,01	-0,007
$d_6$	-0,034	-0,024	$d_{16}$	0,038	0,027
$d_7$	0,011	0,016	$d_{17}$	-0,024	-0,015
$d_8$	0,063	0,089	$d_{18}$	-0,009	-0,006
$d_9$	-0,034	-0,077	$d_{19}$	0,009	0,006
$d_{10}$	0,002	0,005	$d_{20}$	-0,016	-0,01

Подавая на систему (9) сигнал типа «белый шум» и определив по формулам (6), (8) значения параметров  $d_k$  для  $S_1$ , получим формирование соответствующего звука. Для перехода от одного звука к другому достаточно пересчитать параметры  $d_k$  по формулам (6), (8) при  $k = \bar{1}, 20$  (таблица).

**Список литературы:** 1. Качмаж С., Штейнгауз Г. Теория ортогональных рядов. М., 1958. 507 с. 2. Уайлд Д. Дж. Методы поиска экстремума. М., 1967. 267 с. 3. Кейтер Дж. Компьютеры-синтезаторы речи. М., 1985. 236 с.

Поступила в редколлегию 30.12.88

## ПРОГРАММНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ В СРЕДЕ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ

При программном моделировании систем производится изучение процессов и явлений внутри системы и окружающей ее среды. Наиболее общим выражением требований объективной общности модели и оригинала в теоретическом моделировании является не изоморфизм, а гомоморфизм. Поэтому воспроизведение модели на ЭВМ (программное моделирование систем) относится к математическому моделированию (имитации), при котором объект (оригинал) представлен некоторым алгоритмом, а ЭВМ реализует программу в некоторую последовательность операций, являющуюся фактической моделью системы.

Недетерминированное моделирование предусматривает оригинал, отражающий основные характеристики системы (объекта), а описание модели, отражающее эти характеристики и их воспроизведение на ЭВМ, — в форме, отличной от детерминированности. Поэтому совпадение результатов моделирования объекта и оригинала оценивается только по совокупности испытаний, т. е. по критериям адекватности.

В классическом моделировании, когда все переменные детерминированы, совпадение результатов моделирования основывается на теории подобия, одной из основных задач которой является установление зависимостей между параметрами процессов, протекающих в оригинале (системе) и модели. Теория подобия предусматривает для переменных исследуемого явления  $x_j$  и соответствующих переменных модели этого явления  $X_j$  связывать с помощью величины, постоянной для данной модели и численно равной отношению

$$M_j = \frac{X_j}{x_j} \text{ или } X_j = M_j x_j.$$

Размерность этой величины равна отношению размерностей переменных  $X$  и  $x_j$  и называют ее масштабом.

Масштабы, как правило, могут быть выбраны произвольно или быть привязанными к разрядной сетке ЭВМ, или оригинала, вследствие того, что исследуемые характеристики модели и оригинала находятся в определенной зависимости друг с другом. Такая неопределенность постепенно утвердила тенденцию [1] в толковании масштабов как некоторых произвольных величин, не являющихся критериями адекватности, а тесным образом связанных с практическими целями. Такой подход не часто приводит к заслуженному успеху, а разнообразие систем порождает столько видов масштабов, сколько типов переменных в модели и, зачастую, с искусственной формой представления их значения. Поэтому возникла необходимость в исправлении ситуации и выработке таких рекомендаций по классификации видов масштабов, чтобы способ их применения соответствовал основным положениям теории подобия и размерности.

Проблемы моделирования систем в среде с ограничениями позволяют выделить два вида масштабов: постоянные масштабы, воздействие которых распространено на все значения переменной или функции; разностные масштабы, воздействие которых распространено только на отдельные значения переменной или функции.

Оба вида масштабов не зависят от типа системной модели и формы представления значений переменных и всецело определены условиями применимости масштабов.

Предположим, что имеет место  $Z = f(x)$ , а после введения масштабов  $Z = M_y Y$  и  $Y = f(M_x x)$ , где  $M_y$  и  $M_x$  — масштабные множители. Тогда, если  $M_x M_y = 1$ , то условие применимости масштабов можно выра-

зить  $M_y = \frac{f(x)}{f(M_x x)} = \text{const.}$

Отсюда при выполнении этого условия применимости можно вводить масштабы отдельно во входную и выходную величины модели или, если  $M_y = \frac{1}{M_x}$ , то можно на входе модели вводить масштаб для переменных, а на выходе выводить масштаб в этих же переменных.

Такое условие применимости позволяет согласовывать масштабы переменных у различных переменных операторов модели.

В случае, если при использовании масштабов осуществить увязку их с разрядной сеткой микро-ЭВМ, то для этого обычно используют некоторые характеристики модели и ЭВМ:

характеристика пределов изменения переменной модели

$$D = E \left( \log_b \frac{x_{\max}}{x_{\min}} \right),$$

где  $b$  — основание системы счисления;  $E$  — символ операции вычисления целой части;  $x_{\min}$ ,  $x_{\max}$  — минимальное и максимальное значения переменной;  $D$  — количество разрядов для разложения переменной;

характеристика разрядности ЭВМ:  $S = E(\log_b H_{\max})$ , где  $H_{\max}$  — количество градаций максимального значения переменных ЭВМ.

При этом связь между характеристиками модели и ЭВМ обычно определяется как  $D \neq S$ , что фактически объясняет представление в ЭВМ. Грубо различают две категории представления переменных в форме чисел с фиксированной и плавающей точкой. Для чисел с фиксированной точкой соотношение определяется как  $D < S$ , и в случае его нарушения приводит к потере старших разрядов числа [2]; для чисел с плавающей точкой  $D = S$  за счет искусственного расширения диапазона изменения представления переменной в ЭВМ, но в случае нарушения этого равенства:  $D > S$ , происходят потери старших разрядов показателя степени.

Таким образом, в представлении переменных в обеих формах возникают критические ситуации, когда разрядная сетка ЭВМ является ограничением среды на переменные модели. Отсюда можно сделать вывод о необходимости введения масштабов.

Использование постоянных масштабов предусматривает представление переменных модели в виде  $X_j = M_j x_j$ , где  $M_j$  — масштаб переменной  $X_j$ . При этом отдается предпочтение естественной форме представления переменных, т. е. каждая моделируемая величина хранится и участвует в вычислениях в одном и том же масштабе. Особенностью использования таких масштабов является введение его на входе операции и выведение на выходе, а сами модели должны иметь итерационный или замкнутый характер.

Пусть простейшая модель имеет вид:

$$S = A + B + C; \quad A = k_1 S; \quad B = k_2 A; \quad C = k_3 B,$$

где  $k_1, k_2, k_3$  — операторы модели.

Если исходить из того, что каждая переменная функционирует в своем масштабе, а каждая величина масштаба определяется максимальным значением переменной и разрядной сеткой ЭВМ, то, определяя масштабы в виде величин  $M_S, M_A, M_B, M_C$ , их использование можно представить

$$\frac{M_S S}{M_S} = \frac{M_A A}{M_A} + \frac{M_B B}{M_B} + \frac{M_C C}{M_C}; \quad \frac{M_A A}{M_A} = k_1 \frac{M_S S}{M_S};$$

$$\frac{M_B B}{M_B} = k_2 \frac{M_A A}{M_A}; \quad \frac{M_C C}{M_C} = k_3 \frac{M_B B}{M_B}.$$

Если ввести преобразования  $M_S S = U_S$ ;  $M_A A = U_A$ ;  $M_B B = U_B$ ;  $M_C C = U_C$ , то соотношение можно переписать в виде:

$$U_B = \frac{M_S}{M_A} U_A + \frac{M_S}{M_B} U_B + \frac{M_S}{M_C} U_C; \quad U_A = \frac{M_A}{M_S} \cdot k_1 U_S;$$

$$U_B = \frac{M_B}{U_A} \cdot k_2 U_A; \quad U_C = \frac{M_C}{M_B} k_3 U_B.$$

Промасштабированные переменные модели отражают основные свойства теории подобия, фиксирующей наличие каждой переменной в своем масштабе, т. е. критерии подобия переменных. Кроме того, при такой методике введения масштаба выполнено правило применимости масштабов:  $M_x M_y = 1$ , где  $M_x$ ,  $M_y$  — входной и выходной масштабы.

В случае, если  $M_x M_y \neq 1$ , то необходимо при введении масштаба аппроксимировать функциональный оператор путем замены его графика (для непрерывных величин) соотношением

$$Y \approx a_0 x_0 + \sum a_i (x_i - x_{i-1}),$$

где  $a_i$  — тангенс угла наклона в приращениях (производная),  $x_i$  — координата значения.

Результат такой аппроксимации оператора позволяет вводить масштаб раздельно для каждой переменной соотношения:  $M_a$  — масштаб производной функции,  $M_x$  — масштаб аргумента функции.

При этом справедливо утверждение: если значения производных масштабируются  $M_a$ , а аргументы —  $M_x$ , то выходной масштаб  $M_y = M_a M_x$ .

Основным недостатком применения постоянных масштабов при непрерывном представлении переменных является зависимость моделируемых переменных от масштаба. Это видно из следующих соображений. Пусть в выражении  $X_j = M_j x_j$  одному и тому же значению  $x_j = x_{j \max}$  при различных значениях может соответствовать некоторое множество значений машинной переменной  $x_j$ .

В случае масштабирования значений переменных, непосредственное применение постоянных масштабов к значению может привести к большой потере точности из-за значительного различия диапазона изменения значения переменных. При этом различают формы представления переменных: величины в форме чисел с плавающей точкой  $Y = px$ , где  $x$  — значение переменной в форме мантииссы,  $p$  — весовой коэффициент, порядок мантииссы и  $Y_{\min} \leq Y_i \leq Y_{\max}$  — нормальная форма представления мантииссы; величины в форме чисел с фиксированной точкой. Пусть имеет место  $Y_{\text{огр}} = 0,XXX \cdot 10^N$  и массив чисел  $Y = 0,XXX \cdot 10^p$ . Тогда, если  $p \leq N$ , то элементы массива удовлетворяют ограничению, но если массив чисел не однороден по разрядности и имеет место  $p > N$ , то необходимы масштабы, ограничивающие количество разрядов в числе.

Если выбрать число  $0 < F < 1$  и определить его как масштаб значения, то введение масштаба в значение числа с плавающей точкой будет соответствовать  $Fp \leq N$ . Для выведения масштабов необходимо вначале выровнять масштабы чисел  $F_1$  и  $F_2$  для такой арифметической операции по наибольшему  $F_j$  и разделить результирующий показатель степени на масштаб  $p = \frac{F_1 F_2}{F}$ .

Для значения переменных в форме чисел с фиксированной запятой применение постоянных масштабов затруднено, но возможно применение разностных масштабов.

Пусть имеется значение  $Y_{\text{огр}} \gg Y$ , тогда введение масштаба не требуется но для случая  $Y_{\text{огр}} < Y$  необходимо представить машинную переменную как часть величины моделируемой переменной

$$Y = \frac{Y - k_i Y}{F_y} \quad \text{и} \quad F_y + k_i = 1,$$

где  $Y$  — моделируемая переменная;  $F_y$ ,  $k_i$  — масштабные коэффициенты.

Приведение моделируемых значений переменных к машинным осуществляется следующим образом: проверяется условие  $Y_{\text{огр}} \gg Y$  и в случае его нарушения выбирается  $k_i > 0$  из последовательности  $k = 0,1; 0,2; \dots$  с подстановкой  $k_i$  в операцию  $Y_F = Y - k_i Y$ ; после выполнения операции снова проверяется условие  $Y_{\text{огр}} \leq Y_F$  и при его нарушении величина  $k_i$  наращивается, в противном случае фиксируется  $k_i$  и вычисляется  $F_y = 1 - k_i$ .

Фиксация  $F_y$  и определение  $Y_F$  дает возможность утверждать, что значение  $Y_F$  в масштабе  $F_y$ .

При сложении (вычитании) со значениями переменных в масштабе необходимо, чтобы все суммируемые величины имели одинаковые масштабы (выравнивание масштабов).

При умножении (делении) выравнивать масштабы нет необходимости. Как правило, выходные масштабные коэффициенты представляют произведение (частное) входных масштабных коэффициентов.

Метод введения разностных масштабов алгоритмичен и легко автоматизируется группой программ микро-программного уровня [3].

Если в качестве ограничений используется не разрядная сетка ЭВМ, а переменные моделирующей системы, критериями подобия являются соотношения, называемые индикаторами подобия.

Предположим, что заданы моделирующая ( $S_1$ ) и моделируемая ( $S_2$ ) системы:

$$S_2: Y_1 = \sum_{i=1}^q a_i X_i; \quad Y_2 = X_i X_M;$$

$$S_1: Y_1 = \sum_{i=1}^q k_i x_i; \quad Y_2 = k_B x_i x_M.$$

Пусть определены постоянные масштабы  $M_x = \frac{k_i x_i}{X_i}$ ;  $M_y = \frac{y_i}{Y_i}$ , тогда после подстановки и преобразований возможные индикаторы подобия соответственно равны:

$$\frac{k_i M_x x_i}{a_i M_y} = 1; \quad \frac{k_B M_x x_i M_x x_B}{M_y} = 1.$$

Отсюда, используя индикаторы подобия, можно найти выражение для моделирующей системы через переменные моделируемой, т. е. интерпретировать моделируемую систему на уровне моделирующей.

**Список литературы:** 1. Левин Л. Методы решения технических задач с использованием аналоговых вычислительных машин. М., 1966. 414 с. 2. Смирнов Б. С., Баду Е. И. Устройства автоматической смены масштабов для АВМ. Л., 1978. 96 с. 3. Разронов Г. И. Выбор масштабов при моделировании. М., 1973. 160 с.

Поступила в редколлегию 14.07.87.

УДК 681.327.120.888

Г. Я. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, А. Н. ПЕРКИН,  
А. М. ПРЯНИЦКИЙ, канд. техн. наук, В. А. ЧИКИНА, канд. техн. наук

### СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

В большинстве случаев решение задач классификации проводится с использованием ЭВМ. Поэтому широкое развитие получили методы, учитывающие, помимо прочего, особенности реализации этих методов на универсальных ЭВМ. Например, предложено решать задачу кластеризации на основе анализа связности структуры данных [1]. Однако связанные структуры в общем случае могут быть довольно причудливой формы, что не согласуется с гипотезой компактности [2]. С другой стороны, необходима интерпретация выделенной структуры данных для человека, что наилучшим образом осуществляется в терминах исчисления высказываний, при этом, как и в [3, 4], будем считать ценность высказывания тем больше, чем оно короче. При геометрической интерпретации высказываний они представляются в виде совокупности гиперпараллелепипедов в пространстве признаков. Очевидно, что чем короче высказывание, тем меньше число гиперпараллелепипедов, представляющих его, и в пределе самое короткое высказывание — два гиперпараллелепипеда.

С учетом сказанного выше целесообразно ввести некоторые ограничения на возможные структуры данных, сформулировать их и использовать далее в работе для решения задачи кластеризации на основе метода, который назван в данной работе структурно-логическим.

Сформулируем ряд определений, на основании которых дадим формальную постановку задачи распознавания образов с самообучением, т. е. задачи кластеризации. Предполагается, что признаки измерены в шкалах порядка, а если нет — то сведены к таким путем квантования количественных шкал и упорядочения значений шкал и значений шкал наименований [1].

Пусть  $X = \prod_{i=1}^n X_i$  — множество всевозможных значений экспериментальных данных,  $X_i = \{0, 1, \dots, k_i - 1\}$  — упорядоченное множество значений признака  $i$  ( $i = \overline{1, n}$ ),  $n$  — количество признаков,  $k_i$  — значность признака  $i$ . Обозначим через  $X$  множество экспериментальных данных. Ясно, что  $X \subseteq X$ .

Дадим следующие определения.

**Определение 1.** Элементы  $x = (x_1 x_2 \dots x_n)$  и  $x' = (x'_1 x'_2 \dots x'_n)$  множества  $X$  называются соседними, если  $|x_i - x'_i| \in \{0, 1\}$  для  $i = \overline{1, n}$ .

**Определение 2.** Элементы  $x, x' \in X$  называются  $l_1$ -соседними ( $l_1 \in \{0, 1, \dots, n\}$ ), если они являются соседними и  $l_1 = n - \sum_{i=1}^n |x_i - x'_i|$ .

**Определение 3.** Множество  $X^* \subseteq X$  называется  $l_2$ -связным ( $l_2 \in \{0, 1, \dots, n\}$ ), если для любых  $x, x' \in X^*$  существует последовательность  $(x, \dots, x'', \dots, x')$ ; каждый элемент которой принадлежит  $X^*$  и в которой любые два рядом стоящих элемента не менее, чем  $l_2$ -соседни.

**Определение 4.** Множество  $X^* \subseteq X$  называется связным, если  $X^*$  является 0-связным и называется максимально связным, если  $X$  является  $(n-1)$ -связным.

**Определение 5.** Множество  $X^* \subseteq X$  называется выпуклым, если  $X^*$  максимально связно и если для любых  $x, x' \in X^*$  не существует  $x'' \in X \setminus X^*$ , для которого  $x$  и  $x'$  является  $(n-1)$ -соседними.

**Определение 6.** Множество  $X^* \subseteq X$  называется  $l_3$ -изолированным ( $l_3 \in \{0, 1, \dots, n\}$ ), если для любого  $x \in X^*$   $l_3$ -соседними являются только  $x' \in X^* \cup (X \setminus X^*)$ .

Для оценки качества кластеризации, полученной в результате работы соответствующего алгоритма обычно, как например в [5], формально определяют, с одной стороны, меру близости объектов, принадлежащих одному кластеру, а с другой стороны, вводят меру взаимной удаленности кластеров. В данной работе предлагается оценивать близость  $r_1$  объектов одного кластера на основе одновременного учета степени связности и выпуклости множества, образующего кластеры:

$$r_1 = \frac{(l_3 n) + v}{2},$$

где

1, если множество выпукло,  
0, в противоположном случае.

Взаимная удаленность  $r_2$  кластеров оценивается как степень изолированности множеств, образующих эти кластеры:  $r_2 = l_3/n$ .

Кроме этих двух показателей качества классификации будем пользоваться еще одним показателем  $r_3$ , отражающим полноту охвата кластерами множества экспериментальных данных, и равным отношению суммы мощностей множеств, представляющих кластеры к мощности множества экспериментальных данных. Целью анализа является нахождение кластеров, максимизирующих векторный критерий качества кластеризации  $R = (r_1, r_2, r_3)$ .

Однако такая оптимизационная задача не может быть поставлена на множестве исходных данных, так как эти данные, с одной стороны, содержат

ошибки измерений, копирования и первичной обработки данных, а, с другой стороны, исходных данных зачастую бывает недостаточно, чтобы из них построить кластеры с высоким значением критерия качества, поэтому необходимо преобразование исходных данных. Это необходимо для того, чтобы устранить ошибки, уменьшающие степень связности и выпуклость кластеров, а также устранить изолированность элементов, принадлежащих одному кластеру и сделать изолированными те кластеры, которые из-за ошибок оказались связными.

Предлагаемые преобразования исходных данных в общем виде функции двух типов:

$$x^t = F'(x^{t-1}, X_x^{t-1}); X_x^t = F''(x^{t-1}, X_x^{t-1}),$$

где  $x^t, x^{t-1}$  — элементы множества  $X$  в моменты времени  $t$  и  $(t-1)$  соответственно;  $X_x^t, X_x^{t-1}$  — некоторые подмножества множества элементов, соседних с  $x$  в моменты времени  $t$  и  $(t-1)$  соответственно.

Общая схема алгоритма преобразования исходных данных состоит в следующем. Из введенных выше функций выбирается набор функций, каждая из которых влияет отдельно на связность, выпуклость и изолированность множества. Алгоритм преобразования состоит в применении этих функций в некотором сочетании различное число раз. После каждой группы преобразований вычисляется векторный критерий качества. Число применений набора функций ограничено тем, что либо в результате преобразований все данные исчезнут, либо данные займут все признаковое пространство. Наступление этих событий означает останова алгоритма. Далее из всех полученных векторных критериев качества выбираются те, которые превосходят остальные по всем трем параметрам, и выдается сообщение о кластерах, соответствующих этим критериям. В таких различных кластеризациях может быть несколько. В случае нескольких типов кластеризаций пользователь выбирает искомую из дополнительных соображений.

Немаловажным аспектом в структурных методах распознавания является представление полученных образов. Обычно это осуществляется снижением размерности исходного пространства до двух- или одномерного пространства. Однако такое преобразование невозможно без потери информации о связности структуры образов. Чтобы избежать такой потери информации, в данной работе предлагается представлять образы в виде логических зависимостей между значениями признаков, которые легко интерпретируются человеком.

**Список литературы:** 1. Александров В. В., Горский Н. Д. Алгоритмы и программы структурного метода обработки данных. Л., 1983. 208 с. 2. Браверман Э. М., Мучник И. Б. Структурные методы обработки эмпирических данных. М., 1983. 464 с. 3. Бонгард М. М. Проблема узнавания. М., 1967. 297 с. 4. Лбов Г. С. Методы обработки разнотипных экспериментальных данных. Новосибирск, 1981. 159 с. 5. Загоруйко Н. Г., Елкина В. Н., Лбов Г. С. Алгоритмы обнаружения эмпирических закономерностей. Новосибирск, 1985. 109 с.

Поступила в редколлегию 09.01.89