РАСШИРЕННЫЙ КОДО-ЛОГИЧЕСКИЙ БАЗИС КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аноприенко А. Я.
Кафедра ЭВМ ДонГТУ

Abstract

Anoprienko A. Extented Logical and Numerical Basis for Computer Simulation. *Computer modelling and simulation of complex phenomena and processes of the real world claims for the development of adequate logic and numerical tools. The traditional binary logic and binary codes often appear in these cases insufficient and inefficient. In the report the scheme of 3D logic space is offered. Such unified system can be named as extended logical basis. 3D logic space of extended logical basis can be formed by three orthogonal axes (“true”, “false”, “membership degree”) and can be used for construction of various logical systems. The extended logic is also a basis for construction of various numerical systems: from monocode to hipercodes.*

Введение

В 90-е годы как самостоятельное научное направление оформилась новая комплексная дисциплина, известная в настоящее время под названием “вычислительный интеллект” (см., например, [1, 22, 36]). По мнению основоположника теории нечетких множеств Л. Заде вычислительный интеллект (ВИ) является альтернативой искусственному интеллекту (ИИ). Одной из особенностей ВИ является ориентация на “мягкие вычисления” (считается, что термины “вычислительный интеллект” и “мягкие вычисления” введены Л. Заде в 1994 г. [49]). В настоящее время ВИ базируется не только на новой по сравнению с ИИ математике, но и на ее соответствующей аппаратной поддержке, что позволяет создавать дешевые конкурентоспособные автономные интеллектуальные системы, базирующиеся на методах ВИ: - от миниатюрных мобильных роботов и средств интеллектуализации бытовой техники до сверхвысокопроизводительных вычислительных и моделирующих сред. Концепция “вычислительного интеллекта” в настоящее время положена в основу создания вычислительной техники так называемого 6-го поколения, в качестве альтернативного названия которого используется также определение RWC - Real World Computers - “компьютеры реального мира”, что призвано подчеркнуть максимальное приближение новых компьютерных технологий к реально используемым человеком и живой природой средствам и методам кодирования, обработки, преобразования и передачи информации.

В качестве одной из важнейших составляющих “вычислительного интеллекта” представляется компьютерное моделирование, эффективно использующее весь спектр интеллектуализации вычислительных методов и средств. Предлагаемая концепция расширенного кодо-логического базиса предназначена, во-первых, для обобщения и систематизации уже имеющихся в этой области результатов. А, во-вторых, что наиболее существенно, - для обеспечения возможности синтеза новых эффективных методов и средств .

Основная идея данной концепции базируется на гипотезе о множественности эволюционирующих кодо-логических форм и методов человеческого мышления. Т. е. в основу данного исследования положено представление о том, что человеческий интеллект в зависимости от конкретной ситуации и решаемой задачи использует в процессе мышления не одну логическую систему, а некоторое достаточно представительное множество таких систем и связанных с ними количественных представлений. Традиционно используемая двоичная логика и основанные на ней системы счисления должны рассматриваться при этом в качестве одного из наиболее значимых, но отнюдь не единственного и не достаточного элемента современного интеллектуального инструментария. Другими важными составляющими являются как некоторые более ранние формы мышления и представления количественной информации, так и целый ряд перспективных, которые существуют пока только в зачаточном или не полностью оформившемся виде, но обладают значительным информационным потенциалом.

1. Многомерное логическое пространство

“В самой идее неединственности логики, разумеется, нет ничего удивительного. В самом деле, с какой стати все наши рассуждения, о чем бы мы ни рассуждали, должны управляться одними и теми же законами? Для этого нет никаких оснований. Удивительным, наоборот, было бы, если бы логика была единственна”[26]

А. А. Марков

Традиционные логические системы являются по сути одномерными, так как строятся в пределах оси, соединяющей логические 0 и 1. В простейшем случае классической бинарной логики используются только два противоположных логических значения. В наиболее сложных случаях, при построении непрерывных, в том числе нечетких, логик используется все пространство оси.

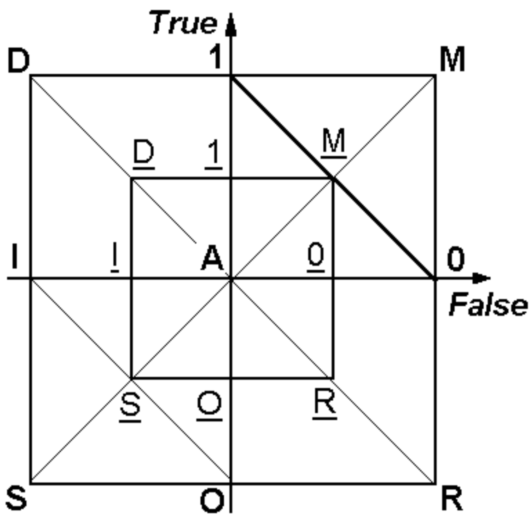

Рис. 1. Двумерное логическое пространство

Расширенное двумерное логическое пространство может быть порождено базисом, состоящим из ортонормированной системы векторов “Истина” (может обозначаться как T - True или Y - “Yes”) и “Ложь” (F - False или N - “No”) с положительной и отрицательной полуосями [8]. Логические значения при этом могут задаваться либо соответствующими координатами (например, в случае построения непрерывных логик), либо фиксацией характерных точек. В качестве последних прежде всего должны быть выделены следующие:

1 и **0** - значения “истина” и “ложь” классической логики;

A - абсолютная неопределенность, “непроявленность”, неизвестность (обозначение A было выбрано исходя из известной критики закона исключения третьего в “Науке логики” Гегеля: “Закон исключения третьего утверждает, что нет ничего такого, что не было бы ни A, ни не-A. Однако третье есть в самой этой тезе: само A есть третье, ибо оно может быть и +A и -A” [26, с. 482], т. е. значение его на момент высказывания утверждения не известно, и эта неизвестность и есть фактически тем самым третьим);

M - множественность, многозначность (и “истина” и “ложь”, и да и нет);

S - симметричность (инверсная многозначность, отражение M относительно точки A);

I и **O** - инверсные “истина” и “ложь” (обозначения выбраны по подобию с 1 и 0, так как предполагается не только симметрия относительно точки A, но и относительно оси DR, при этом если 1 и 0 соответствуют положительному выбору некоторых значений из всего возможного множества, то I и O соответствуют отрицательному выбору, т. е. по принципу “все значения кроме данного”);

D и **R** - мнемонически соответствуют понятиям “дублирование” и “репликация”, т.е. формы многозначности, по разному комбинирующие свойства значений M и S.

Каждой из перечисленных характерных точек может быть поставлена в соответствие точка, расположенная на половине расстояния между ней и A. Значения, соответствующие таким точкам, обозначим аналогичными символами, но с подчеркиванием, что мнемонически может ассоциироваться с дробностью, половинчатостью. Суть данных значений состоит в том, что в них неопределенность принимает вероятностный характер, т. е. равновероятны равноудаленные значения. Например, значение $\underline{M}$ предполагает равновероятность 0 и 1.

Приведенные обозначения существенно отличаются от тех, которые первоначально использовались в работе [2]. Изменение обозначений вызвано в основном двумя причинами: необходимостью улучшения их мнемонических свойств и стремлением к максимальному соответствию используемых обозначений (с учетом возможных их расшифровок) смысловому содержанию.

Смысл предложенных значений может быть проиллюстрирован на одном простом примере. Поведение монеты при бросании принято считать классическим случаем равновероятного события. Однако, если предположить, что равновероятность выпадения орла или решки не является обязательной, то можно выделить следующие варианты знания о поведении монеты при бросании: A - ничего не известно и возможны любые варианты; $\underline{M}$ - монета ведет себя классически, обеспечивая равновероятность орла и решки; M - монета всегда при бросании падает на ребро и остается в вертикальном положении, оставляя одновременно открытыми и орла и решку; 1 - при бросании всегда выпадает решка; 0 - всегда орел; $\underline{1}$ - монета доступна для наблюдения после бросания только в половине случаев, при этом каждый раз наблюдается решка; $\underline{0}$ - аналогично предыдущему случаю, но наблюдается орел.

Таким образом, введение новых логических значений позволяет значительно расширить возможности формализованной логической оценки различных нюансов реальных процессов и ситуаций.

В двумерном логическом пространстве могут быть построены различные логические системы, отличающиеся прежде всего количеством используемых логических значений. Возможные логические системы будем обозначать как L_N^K, где K есть количество используемых логических значений или *порядок* логики, а N - порядковый номер логической системы в наборе рассматриваемых логик порядка K. В контексте данного раздела логическую систему будем интерпретировать лишь как множество соответствующих логических значений, т.е. $L_N^K = \{x_1, x_2, ..., x_K\}$, хотя в общем случае логическая система определяется как множеством логических значений, так и множеством логических функций. С целью терминологического единообразия для наименования логических систем будем использовать слово “логика” в комбинации с греческим корнем, соответствующим значению K. Введем, в частности, в рассмотрение следующие логические системы:

монологика: $L_1^1= \{1\}$(в принципе возможны и другие системы, например, $L_2^1= \{0\}$, но с практической точки зрения достаточно ограничиться L_1^1, что соответствует рассмотрению и фиксации лишь “положительных” фактов и суждений);

дилогика: $L_1^2 = \{1, 0\}$ - соответствует классической бинарной логике; возможно, но с практической точки зрения вряд ли целесообразно, построение и других вариантов дилогики, например $L_2^2 = \{1, A\}$, $L_3^2 = \{A, 0\}$ и т. п.;

трилогика: $L_1^3 = \{1, 0, A\}$, $L_2^3 = \{1, 0, \underline{M}\}$, $L_3^3 = \{1, 0, M\}$, что покрывает практически все ранее предложенные варианты трилогики;

тетралогика: $L_1^4 = \{1, 0, A, M\}$ и $L_2^4 = \{1, 0, \underline{M}, M\}$, что соответствует ранее предложенным в работе [2] вариантам тетралогики; существенный интерес представляют также следующие варианты тетралогики $L_3^4 = \{1, 0, S, M\}$, а также $L_4^4 = \{1, 0, A, \underline{M}\}$.

пенталогика: $L_1^5 = \{1, 0, A, \underline{M}, M\}$, $L_2^5 = \{1, 0, A, S, M\}$ и т. п.;

гексалогика: $L_1^6 = \{1, 0, A, \underline{M}, M, S\}$ и др.;

октологика: $L_1^8 = \{1, 0, M, R, O, S, I, D\}$, $L_2^8 = \{1, 0, M, S, R, D, A, \underline{M}\}$ и др.;

декалогика: $L_1^{10} = \{1, 0, M, R, O, S, I, D, A, \underline{M}\}$и др.;

гексадекалогика: $L_1^{16} = \{1, 0, M, R, O, S, I, D, \underline{1}, \underline{0}, \underline{M}, \underline{R}, \underline{O}, \underline{S}, \underline{I}, \underline{D}\}$и т. д.

Логики третьего и более высоких порядков, существенно отличающиеся от классической, целесообразно объединить одни термином, используя для этого, например, обозначение “**гиперлогика”**.

Естественно, что перечисленные выше логики отнюдь не исчерпывают всех возможных вариантов, число Q_K которых для каждой из логик K-того порядка определяется количеством K-сочетаний из n различных значений, заданных в логическом пространстве:

$$Q_K = \frac{n!}{K!(n-K)!}.$$

Если ограничиться только семью возможными логическим значениями в пределах одного положительного квадранта логического пространства, т. е. принять $n = 7$, то количество всех возможных вариантов дилогики составит $Q_K = 21$. Для трилогики, как и для тетралогики, получим 35 вариантов. Однако, естественно, далеко не все эти варианты равноценны: практическое значение большинства из них представляется весьма проблематичным. Поэтому из всего множества вариантов выделены лишь те, которые уже сейчас можно идентифицировать как достаточно продуктивные, в т.ч. - с точки зрения образования на их базе эффективных систем кодирования количественной информации..

Аналогично тому, как бинарная логика является основой двоичной системы счисления, на базе перечисленных выше логических систем могут быть построены соответствующие системы кодирования количественной информации. Все вводимые системы кодирования будем рассматривать на машинном уровне, т. е. на уровне двоичной системы счисления, когда кодовый алфавит однозначно совпадает с алфавитом соответствующей логической системы. Системы кодирования при этом могут быть заданы так же, как и соответствующие логические системы. Таким образом в рассмотрение могут быть введены:

монокоды: $C_1^1 = \{1\}$;

дикоды: $C_1^2 = \{1, 0\}$ и др.;

трикоды: $C_1^3 = \{1, 0, A\}$, $C_2^3 = \{1, 0, \underline{M}\}$, $C_3^3 = \{1, 0, M\}$и др.;

тетракоды: $C_1^4 = \{1, 0, A, M\}$ и $C_2^4 = \{1, 0, \underline{M}, M\}$, $C_3^4 = \{1,0, S,M\}$, $C_4^4 = \{1,0,A,\underline{M}\}$ и др.;

пентакоды: $C_1^5 = \{1, 0, A, \underline{M}, M\}$, $C_2^5 = \{1, 0, A, S, M\}$ и т. п.;

гексакоды: $C_1^6 = \{1, 0, A, \underline{M}, M, S\}$ и др.;

октокоды: $C_1^8 = \{1, 0, M, R, O, S, I, D\}$, $C_2^8 = \{1, 0, M, S, R, D, A, \underline{M}\}$ и др.;

декакоды: $C_1^{10} = \{1, 0, M, R, O, S, I, D, A, \underline{M}\}$и др.;

гексадекакоды: $C_1^{16} = \{1, 0, M, R, O, S, I, D, \underline{1}, \underline{0}, \underline{M}, \underline{R}, \underline{O}, \underline{S}, \underline{I}, \underline{D}\}$и т. д.

Аналогично тому, как это было сделано для логических систем, для всех систем кодирования третьего и более высоких порядков может быть введен обобщающий термин “**гиперкоды”**.

В совокупности перечисленные логические и кодовые системы образуют **расширенный кодо-логический базис**.

Следует отметить, что возможности расширения кодо-логического базиса не исчерпываются двумерным логическим пространством, в котором, в частности, не находят своего отражения в явном виде идеи нечеткой логики [19, 36, 48, 49, 50]. Этот недостаток может быть устранен **расширением логического пространства до трехмерного путем введения вектора функций принадлежности в качестве третьей составляющей ортонормированного базиса**. При этом двумерному пространству классических функций принадлежности нечеткой логики будет соответствовать плоскость, ортогональная осям “ложь” и “истина” и пересекающая их в точках логических значений 0 и 1.

2. Монологика

Весьма существенным представляется введение в рассмотрение понятий монологики и монокодов, так как в данном случае имеет место отнюдь не абстрактная “манипуляция с терминологией”, а новый методический подход к систематизации и вовлечению в круг интересов компьютерных наук чрезвычайно важного массива интеллектуальных достижений человеческой культуры, практически выпавших из рассмотрения в современной информатике. Более того, анализ закономерностей и особенностей перехода от монологики к дилогике и от монокодов к дикодам позволит эффективно использовать этот опыт при переходе к гиперлогике и гиперкодам.

С уверенностью можно констатировать, что монологика явилась исторически первым логическим построением, освоенным человеческим мышлением. Этот факт однозначно отражен в особенностях построения так называемого праязыка, наиболее полно реконструированного сегодня на материалах индоевропейской языковой семьи (см., например, [25]). Отмечаются, в частности, следующие реконструированные особенности генетически ранних языковых форм [24]:

во-первых, господство простых единичных суждений, выражающих и закрепляющих знания о тех предметах, которые в результате практических потребностей рассматривались как предметы отдельные;

во-вторых, как следствие, отсутствие способов синтаксического подчинения и дифференцированной системы союзных отношений, т. е. единственным способом выражения грамматических связей между словами в предложении было примыкание, а поэтому индоевропейское предложение было способным только к простому соположению слов, выражающих понятия, и, следовательно, речь могла строиться только в виде упрощенного монолога, состоящего из последовательности простых суждений (даже в классической латыни нередки случаи, когда сложное суждение еще не получает должного языкового выражения);

в-третьих, практически единственным видом умозаключений был вывод от единичного к единичному - явление, ярко выраженное сегодня в мышлении детей дошкольного возраста.

Сложноподчиненные предложения с подчинительными союзами (так, как, потому что, ибо, и т.п.) впервые появляются только после распада индоевропейской языковой общности и образования современных языковых семей, приспособленных для тонкой передачи не только мыслей любой сложности, но и их зависимости друг от друга. А это явление датируется примерно 5 - 3 тысячелетием до н. э.

В качестве примера можно обратиться к “Ригведе” (РВ) - древнейшему из сохранившихся текстов достаточно большого объема [30]. Та часть РВ, которая на сегодня уверенно идентифицирована как наиболее древняя, уходящая корнями устной традиции в эпоху индоевропейской общности, целиком и полностью выдержана в упрощенной монологической форме и состоит из слабо связанных логически последовательностей констатирующих суждений, призывов, заклинаний и риторических вопросов. Из более чем тысячи гимнов РВ не более чем два десятка с большей или меньшей достоверностью можно назвать диалогами, причем лишь в их зачаточной неразвитой форме. Даже в наиболее поздних частях РВ для диалогов характерны такие явления, как отсутствие достаточно ясной связи между репликами, впечатление об отсутствии каких-то звеньев в развитии событий, частая невозможность уверенной идентификации авторов реплик [30, с.492]. Для целей нашего изложения важно также отметить характерную для РВ неразвитость логического отрицания и вытекающей из него системы логических противопоставлений. Выражается это прежде всего в ярко выраженной и довольно хаотичной многозначности лексики, доходящей до того, что некоторые слова могут объединять в себе прямо противоположные значения, как, например, *ari* - “друг” и “враг”, *maya* - “сверхъестественная мудрость” и “обман”. При этом конкретное значение существенно зависит от контекста и не всегда может быть определено с достаточной степенью уверенности.

Характерным для РВ является также отсутствие каких-либо намеков на возможность логического получения знаний, что обусловлено невозможностью построения на базе монологики сколь-нибудь развитой системы логических операций. Авторы Ригведы обозначаются словом риши, которое кроме значения “мудрец” имеет также и значение “поэт”. “Поэт в обществе ариев был носителем той мудрости, которая в моменты озарения открывается богами отдельным избранным лицам. Поэт молит богов о том, чтобы ему были дарованы эти мгновения просветления, когда перед ним раскрывается божественная истина, скрытая от обычных людских взоров. Мудрость - это раскрывающаяся на мгновение картина. Способ ее постижения - видение. Видит поэт внутренним взором, интуицией, внезапная вспышка которой озаряет для него божественную картину истины... В смене этих откровений заключалось познание мира, кодируемое словом *dhi* - “мысль, представление, взгляд, понятие, интуиция, познание, разум.” [30, с.458]. В современном языке с внелогическим оформлением и синтезом знаний связаны именно слова, происходящие от упомянутого индоевропейского корня: например, “в**дох**новение” в русском языке и “на**дх**нення” в украинском.

Из логических операций с монологикой уверенно может быть связана лишь **импликация** (лат. *Implicatio* - сплетение), соответствующая в современном обыденном языке связке “если..., то ...”. Если отождествить импликацию с логическим следованием в форме $x \to y$, то содержание ее можно свести к следующим утверждениям: “если высказывание х истинно, то оно следует из любого высказывания у”, и “если х ложно, то из него следует любое у”. В современную формальную логику данные утверждения вписываются не без проблем, в связи с чем возникло понятие “парадокса материальной импликации” [33, с.218]. Одной из причин такой ситуации является, по-видимому, реликтовость данной операции, унаследованной бинарной логикой из монологики, где она еще до оформления ее в языковую конструкцию являлась основой построения простейших суждений “от единичного к единичному”.

В алгоритмическом плане монологике соответствует простая последовательность операторных вершин, выполнение которой реализуется в соответствии с правилом “если выполнен текущий оператор, то переходи к выполнению следующего”. Большинство современных инструкций по подготовке к эксплуатации технических устройств, например, являются именно такими простейшими алгоритмами.

3. Дилогика

Важнейшей предпосылкой перехода от монологики к дилогике явилась необходимость в четком оформлении понятия отрицании и соответствующей разработке системы противопоставлений. В монологике отрицание как таковое еще четко не оформлено и может пониматься в основном как “непроявленность”, неясность, недоступность для понимания. Так, например, в “Гимне о сотворении мира” в РВ отрицание интенсивно используется для описания непознаваемой ситуации “до сотворения”: “Не было не-сущего, и не было сущего тогда... Не было ни смерти, ни бессмертия тогда, Не было ни признака дня [или] ночи...” [14, с. 44], что в некоторых варианта перевода на современный язык может звучать вполне абсурдно: “Было не было и Не-было тоже...” [16, с. 125]). Для античной же науки характерен как раз повышенный интерес к четкой проработке проблемы отрицания.

Для современного ученого чрезмерное увлечение пифагорейской школы учением о противоположностях представляется иногда весьма наивным, оправданным лишь для первых шагов познания. Однако, явление “гиперииспользования”, когда применимость новшества испытывается везде, где это возможно, наблюдается повсеместно и в современной науке в процессе любых действительно многообещающих нововведений. Поэтому правильнее считать “науку о противоположностях” не первыми шагами научного познания как такового, начавшегося значительно раньше, в “эпоху монологики”, а начальным этапом “эпохи дилогики”. Связанной с этим “болезнью роста” можно считать и гипертрофированное использование древнегреческими философами диалоговой формы научных трактатов, несколько раздражающей своей навязчивостью современного читателя. Любопытно отметить, что последний ярко выраженный всплеск повышенного интереса к диалогу в научных текстах, имел место в XV веке, когда в Европе окончательно утверждалась в качестве основной системы записи чисел индийско-арабская система с нулем [35, с. 111]. А именно наличие и регулярное использование специального знака для нуля является наиболее характерным признаком дикодов, построенных на основе дилогики.

Основной современной формой дилогики стала бинарная логика, оперирующая значениями “истина” и “ложь”, однако определенный интерес могут представлять и другие её варианты, оперирующие, например, такими парами логических значений, как “истина” и “неизвестность” или “истина” и “многозначность”.

4. Трилогика

Простейшим строгим обобщением классической логики явилась трилогика - троичная логика, в которой к двум традиционным значениям “истина” и “ложь” добавляется в какой-либо форме значение неопределенности. При этом особый интерес представляет тот факт, что и в данном случае развитие логических систем было тесно связано с дальнейшей разработкой понятия отрицания.

Впервые формальная трехзначная пропозициональная логика была построена Лукасевичем в 1920 г. [41]. В ней “истина” обозначена как 1, “ложь” - 0, “нейтрально” (“возможно”) - 1/2. В качестве основных функций рассматриваются отрицание и импликация, а производными от них считаются конъюнкция и дизъюнкция, определяемые соответственно как минимум и максимум значений аргументов.

Характерной особенностью логики Лукасевича является нейтральность операции отрицания в отношении значения “возможно”.

Обобщенная *n*-значная система Поста (1921 г. [44]) предполагала уже введения двух видов отрицания: циклического N^1 ($[N^1x] = [x] + 1$ при $[x] < n$ и $[N^1n] = 1$) и симметричного N^2 ($[N^2x] = n - [x] + 1$). При n = 2 эти отрицания совпадают, но уже при n = 3 они по разному оперируют с логическими значениями. Существенным при этом является единообразие влияния каждого из видов отрицания на весь набор логических значений.

Следующим существенным шагом в развитии трилогики является трехзначная система советского логика Бочвара (1938 г. [15]), построенная на разделении высказываний на имеющие смысл (т. е. истинные или ложные) и бессмысленные. При этом “истина” обозначается как R, “ложь” - F, “бессмысленность” - S. Для данного набора значений таблично задаются уже три следующие вида отрицаний: $\neg a$ - внешнее отрицание; $\sim a$ - внутреннее отрицание; $\bar{a}$ - внутреннее отрицание внешнего утверждения. Следует отметить, что данное построение, пожалуй впервые для разработок в области неклассических логик, оказалось весьма полезным практически для разрешения ряда парадоксов классической математической логики методом формального доказательства бессмысленности определенных высказываний. В частности, с помощью своей системы Бочвар смог разрешить парадокс Рассела о множестве всех нормальных множеств, доказав несуществование такого множества.

Среди последующих работ в области трилогики может быть выделена трехзначная система Рейхенбаха (1946 г. [45]), которая заслуживает внимания хотя бы потому, что в ней многозначная логика впервые вводится исходя не из исключительно внутренних потребностей математики или логики как таковой, а ввиду потребностей несколько менее абстрактной специальной науки. Рейхенбах построил свою трехзначную систему для описания явлений квантовой механики. Основным положением системы является утверждение о том, что говорить об истинности или ложности высказываний правомерно лишь тогда когда возможно осуществить их проверку. Если же нельзя ни подтвердить, истинность высказывания (“верифицировать”), ни опровергнуть его с помощью проверки, то такое высказывание должно оцениваться третьим значением - неопределенно. Характерным примером являются высказывания о ненаблюдаемых объектах в микромире. Рейхенбах ввел 3 вида отрицаний: циклическое, диаметральное и полное, которые различаются в основном их действием в отношении “неопределенности”.

В современных условиях наибольший и постоянно возрастающий интерес к различным вариантам трилогики проявляют специалисты в области разработки интеллектуальных систем. В работе [20], например, вводится понятие информационного ноля Θ и троичная шкала Bit = $\{0,1,\Theta\}$, которая выражает абстрактную семантику номинативной (да, нет, не знаю да или нет) и логической (истина, ложь, истинность неизвестна) шкал. Информационный ноль в данном контексте определяет формализованную внутреннюю неопределенность переменной $x = \Theta$ в двоичной шкале. Операции классической логики переносятся при этом в трилогику следующим образом: если вариации неопределенных входных значений изменяют результат операции, то ей присваивается неопределенное значение Θ, в противном случае неопределенности “поглощаются” и троичная функция имеет вполне определенное значение.

Обобщая сложившиеся на сегодня наиболее распространенные подходы к реализации трилогики в компьютерных науках, ее операции можно свести в таблицу:

a b	$\neg$ a	a + b	a · b	a → b	a ↔ b	a ⊕ b	a ↓ b	a │ b
0 0	1	0	0	1	1	0	1	1
0 A	1	A	0	1	A	A	A	1
0 1	1	1	0	1	0	1	0	1
A 0	A	A	0	A	A	A	A	1
A A	A	A	A	A	A	A	A	A
A 1	A	1	A	1	A	A	0	A
1 0	0	1	0	0	0	1	0	1
1 A	0	1	A	A	A	A	0	A
1 1	0	1	1	1	1	0	0	0

В приведенной таблице неопределенность обозначена в своем крайнем выражении как “неизвестность” A, ¬a есть отрицание a (понимаемое в его простейшем виде, характерном для бинарной логики), a+b и a·b есть соответственно логическая сумма (дизъюнкция) и произведение (конъюнкция), a→b - импликация (следование), a↔b - эквиваленция, a⊕b - сумма по модулю 2, a↓b - стрелка Пирса (отрицание дизъюнкции), a│b - штрих Шеффера (отрицание конъюнкции). Данная таблица будет выглядеть аналогично при замене A на другие виды неопределенности, например, $\underline{M}$ или M.

5. Тетралогика

Если не считать n-значной системы Поста, которая с логической точки зрения при n>3 представляется достаточно тривиальной и не вносящей ничего принципиально нового по сравнению с трилогикой, то можно считать, что первый шаг в области тетралогики был сделан также Лукасевичем (1957 г. [40]). Суть предложенного подхода заключалась в том, что неопределенность разделялась на два логических значения: “вероятность” (как приближение к “истине”) и “невероятность” (как приближение ко “лжи”). Причем данный шаг интерпретировался как явное выражение тех идей, которые в зародышевом виде содержались уже в аристотелевой логике. Следует признать, однако, что как и система Поста, данная логика существенно не продвинула развитие логических идей по сравнению с трилогикой, так как все построения по-прежнему оставались в одномерном пространстве - в пределах оси “0-1”.

Одной из ранних попыток осмысленного выхода за пределы одномерного логического пространства была реализована уже в первых веках нашей эры в весьма сложной с логической точки зрения концепции Троицы, что, надо полагать, явилось результатом исчерпания (в основном) философского потенциала античной дилогики и необходимостью дальнейшего развития интеллектуального инструментария. Кажущаяся несогласованность догмата о “триединой, единосущной и нераздельной” христианской Троице с формальной логикой (фактически - дилогикой) толкала многих на “еретические” построения, которые по сути своей являлись различными вариантами сведения ее многомерной логики к более привычной одномерной. Это непонимание не исчерпало себя и к XX веку. Другой крайностью и по сей день является сознательный отказ от понимания всех тонкостей догмата. Так, например, о. Павел Флоренский в своей книге “Столп и утверждение истины” утверждал , что положения догмата Троицы антимоничны (противоречивы по форме), а, следовательно, для рассудка ничего не значат и могут быть лишь “преодолены подвигом веры”. Однако, академик Б.В. Раушенбах убедительно показал, что математика к настоящему времени по существу уже оперирует математическими объектами, обладающими всеми логическими свойствами Троицы, и в качестве примера такого объекта привел вектор с тремя ортогональными составляющими [29]. Другими попытками преодоления одномерности логики можно считать древнекитайскую концепцию “гармонии противоположностей” (через взаимопроникновение и взаимодополнение противоположных начал Инь и Ян) и диалектическую концепцию “единства и борьбы противоположностей”.

В вычислительной технике возможность и необходимость выхода за пределы одномерного логического пространства впервые была достаточно четко декларирована в 1976 году американским математиком Н. Белнапом в работах “Как нужно рассуждать компьютеру” и “Об одной полезной четырехзначной логике” [12], в которых была предложена четырехзначная логика со следующими значениями истинности: T - “только Истина” (True); F - “только Ложь” (False); N - “ни Истины, ни Лжи” (None); B - “и Истина и Ложь” (Both). Необходимость четырехзначной логики обосновывалась тем, что входные данные могут поступать в компьютер из различных независимых источников, что может привести к достаточно типичной информационной ситуации: появлению противоречивой информации. Предложенная логика рассматривалась как средство практического преодоления такой ситуации.

В 1996 году независимо и практически одновременно вводится специальное понятие “тетралогика” для обозначения четырехзначной логики в работах [2] и [20]. В частности, в работе [20] введение данного понятия аргументировалось следующим образом: “Простейший учет внешней неопределенности состоит в переходе к тетралогике с фатальным (квадратным) нулем, который метит абсурдные ситуации внешней неопределенности фактических и априорных знаний в шкале (0,1,Θ,□), и наличие на значимом входе любой функции квадратного нуля порождает на выходе функции знак □. При отсутствии в процессе фатальных ошибок и внутренних неопределенностей трилогика и тетралогика воспроизводят классическую логику”.

В работе [2] и данной статье тетралогика трактуется существенно шире. **Во-первых,** предполагается возможность построения различных вариантов тетралогики, включающих в качестве логических значений кроме классических 1 (“истина”) и 0 (“ложь”) также различные парные комбинации следующих значений: A (“неопределенность”, “непроявленность” - аналогично N в логике Белнапа), M (“множественность” - аналогична B в логике Белнапа), <u>M</u> - (“возможность”, “равновероятность” - аналогична значению “возможно” в трилогике Лукасевича), S (“симметричность”, “отражение”), <u>S</u> (“возможность симметричности”) и другие, представленные на рис. 1. **Во-вторых,** четко декларируется *три вида* логических значений, отличных от классических: *первый* вид - это значение полной неопределенности A; *второй* - неопределенность однозначных значений (<u>M</u>, <u>S</u> и др., расположенные в логическом пространстве на границах квадратах <u>MRSD</u>); и *третий* - выражающий многозначность или множественность значений (M, S и др. На границах квадрата MRSD), что, соответственно, в зависимости от конкретных ситуаций и задач, позволяет с максимальной эффективностью реализовывать и использовать одни или другие варианты тералогики. **В-третьих**, что наиболее существенно, тетралогика в различных ее проявлениях рассматривается прежде всего как основа для построения эффективных систем кодирования количественной информации, обладающих по сравнению с традиционными рядом качественных преимуществ.

“Проблема отрицания” в тетралогике и других гиперлогиках требует существенно более глубокой проработки, чем в дилогике. В первом приближении различные альтернативы операции логического отрицания могут задаваться как симметричные преобразования относительно тех или иных осей двумерного логического пространства. Например, отрицание в дилогике и трехзначной логике Лукасевича есть симметричное отражение относительно оси АМ.

6. Монокоды

Несколько упрощенно монокоды можно определить как коды без ноля. Другими характерным признаками монокодов является их непозиционность и представление значений соответствующим количеством определенных предметов или знаков. Другими словами, в случае монокодов некоторое количество чего-либо прямо репрезентуется соответствующим количеством счетных знаков или предметов. Простейшими примерами монокода есть нарастающие ряды зарубок или других однородных меток, которые не только сегодня служат простейшим средством для последовательного подсчета каких-либо событий, но и по многочисленным археологическим свидетельствам являлись на ранних этапах развития цивилизации единственным средством фиксации числовых значений (см., например, [23]).

Многие из первичных форм и приложений монокода сохранились в употреблении и сегодня. Наиболее типичный пример: точечные обозначения на игральных костях, использование которых в обиходе древнейших носителей индоевропейского праязыка подтверждается не только древнеиндийскими тестами, но и целым рядом археологических находок (см., например, [31]). Другим наглядным примером являются костяшки счетов, ведущих свою родословную от древнейшего счетного прибора - абака.

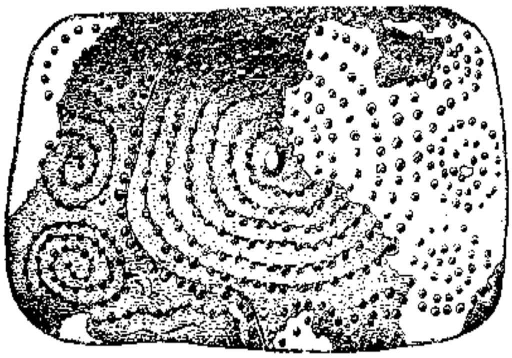

Рис. 2. Пластина с узорами монокода

Несмотря на кажущуюся примитивность, уже простейшие формы монокода могли использоваться для весьма сложных вычислений и, что особенно важно в контексте данной статьи, построения довольно развитых средств вычислительного моделирования. Наиболее ярким (и пока фактически уникальным) примером такого рода является хранящаяся в Эрмитаже костяная пластина (рис. 2), возраст которой по разным оценкам может составлять от 15-ти до 25-ти тысяч лет. Детальная реконструкция и расшифровка точечных узоров на пластине позволяет достаточно уверенно идентифицировать ее как тщательно продуманный вычислительный прибор, позволяющий относительно просто отслеживать и прогнозировать основные календарные и астрономические события, а также - изменения в видимом положении небесных тел [24].

Одной из основных проблем при работе с монокодами является представление больших чисел. Поэтому развитие монокодов шло в основном по пути введения специальных знаков для определенных количеств, что должно было облегчать представление относительно больших значений. Так, например, уже на ранних стадиях (3200 г. до н. э.) развития цивилизации Древнего Египта существовали отдельные обозначения для чисел до девяти (в виде вертикальных черточек), десятков (короткий изогнутый отрезок веревки), сотен (спирально свернутый отрезок веревки, по форме напоминающий узоры на упомянутой выше пластине), а также - тысяч, десятков, сотен тысяч и миллиона [37]. Известны также изыскания пифагорейской школы в области так называемых фигурных чисел. Наиболее же развитыми системами монокода явились греческая и кириллическая алфавитная цифирь, т. е. система представления цифровых значений символами алфавита со специальными обозначениями (рис.3). Такая форма записи чисел была общеупотребительной в России вплоть до XVIII века. Из сохранившихся сегодня в употреблении развитых форм монокода необходимо отметить в первую очередь римскую систему нумерации.

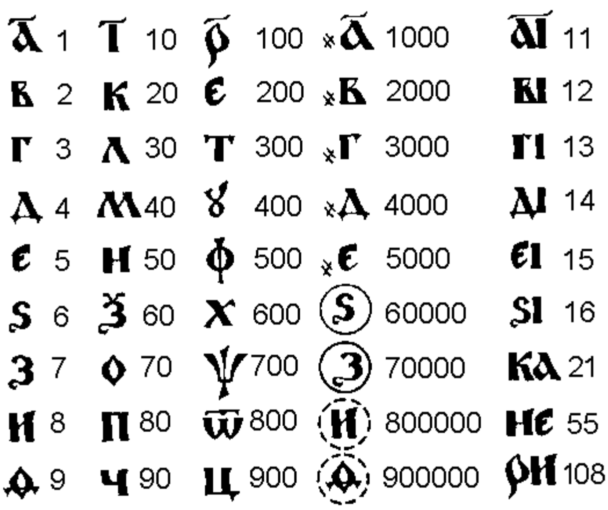

Рис. 3. Одна из наиболее развитых форм монокода: числовые значения символов кириллицы

Заметим, что ранние формы монокода были максимально удобны для последовательного инкрементного (или декрементного) счета. Поздние формы монокода были относительно хорошо приспособлены для компактного представления натуральных чисел вплоть до миллионов. Однако уже простое сравнение чисел, представленных монокодами, а тем более - выполнение с ними основных арифметических операции, являлось чрезвычайно сложной задачей. В связи с этим практически повсеместно для вычислительных операций использовались специальные средства типа абака, существенно облегчающие манипуляции с монокодами.

Абак оставался в качестве основного вычислительного средства вплоть до широкого распространения десятичной "арабской" системы, включившей нуль в качестве одной из равноправных цифр.

7. Дикоды

Дикоды могут быть определены как "позиционные системы с нулем", основанные на использовании дилогики. Наиболее простой и очевидной формой дикода является классический двоичный (бинарный) код, к которому могут быть сведены и все другие из используемых сегодня в вычислительной технике систем счисления: троичная, восьмеричная, десятичная, шестнадцатиричная и пр.

"Изобретение нуля" по праву считается одним важнейших шагов на пути к современной математике. Достаточно отметить такой факт, что в математический язык понятие "алгоритм" пришло вместе с нулем [35, с. 93]: одним из первых источников, принесших вместе с десятичной позиционной системой понятие нуля в Западную Европу, стал латинский перевод XII века книги известного арабского мыслителя IX века аль-Хорезми, которая в переводе называлась "Об индийском числе, сочинение

Алгоризми”. Вынесенное в заглавие латинизированное имя автора как раз и стало прообразом слова “алгоритм”. Практически одновременно, от названия другой книги аль-Хорезми, сформировалось и понятие “алгебра”, что отнюдь не случайно. Ибо с введением нуля, а фактически, в нашей интерпретации, при переходе от монокодов к дикодам, появилась реальная возможность достаточно простой алгоритмизации основных арифметических действий, что послужило стимулом и основой развития алгебраического методов в математике. Процесс перехода от монокодов к дикодам в Европе растянулся на несколько столетий и проходил в острой борьбе, как тогда считали, двух наук: одной - математики на абаке, другой - математики без абака, на бумаге. Эта борьба известна в истории математики как борьба абакистов и алгоритмиков [10, с. 50].

Утверждение дикодов в качестве основной формы представления числовых значений открыло дорогу не только интенсивной алгоритмизации и алгебраизации математики, но и определило переход от абака к механическим арифмометрам, а также - к весьма своеобразным механическим устройствам вычислительного моделирования, работающих по принципу часового механизма (см., например, [28]). Главный же успех дикодов был обеспечен электронными вычислительными машинами, в которых они оказались наиболее эффективными именно в своей простейшей двоичной форме. Однако с переходом к так называемым ненеймановским архитектурам, которые в настоящее время представлены в первую очередь массивно параллельными и сетевыми вычислительными структурами, начинает все более ощущаться ограниченность дикодов как практически единственных методов кодирования числовых значений в ЭВМ. Эта ограниченность выражается прежде всего в следующем (см. также [2]):

- в современных массивно-параллельных системах удельный вес межпроцессорного информационного обмена соизмерим, а порой и превосходит удельный вес чисто вычислительных операций (см., например, [46]), что требует максимального повышения компактности кодирования информации для внешнего обмена, в т. ч. даже за счет возможного повышения трудоемкости ее внутрипроцессорной обработки - кардинально же изменить здесь ситуацию на базе дикодов не представляется возможным;
- интенсивное распространение новых методических, вычислительных и алгоритмических подходов, например, т. н. мягких вычислений, генетических алгоритмов и т. п., требует соответствующей поддержки их как на аппаратном уровне, так и на уровне форматов данных и форм кодирования числовой информации; при этом желательно обеспечивать это не специфическими для каждого из подходов средствами, а максимально универсальными, что в рамках ориентации исключительно на дикоды представляется крайне затруднительным;
- расширение применения различных форм вычислительного моделирования, в том числе с использованием массивно параллельных структур, предполагает реализацию различных источников сигналов, в том числе стохастических, а также - требует эффективного численного описания различных сложных структур реального мира, в т. ч. характеризуемых вариабельностью параметров, а также - той или иной степенью регулярности структурной организации, что также практически не поддерживается традиционными дикодами.

8. Гиперкоды

Подобно тому, как переход от монокодов к дикодам открыл принципиально новые возможности для развития математики и новых вычислительных средств, переход к гиперкодам также может открыть новые горизонты как в теоретическом плане, так и с точки зрения практической эффективности.

Основные особенности гиперкодов рассмотрим на примере различных вариантов тетракода. В качестве иллюстраций будем использовать отображения трехразрядных кодовых комбинаций на числовую ось, представляющую целочисленные значения от 0 до 7 (эта операция по сути своей аналогична преобразованию тетракодов в простейший монокод, который для небольших численных значений является существенно более наглядным, чем прочие коды). При этом обозначать значения на числовой оси будем при помощи следующих символов: “-“ - незадействованные значения; “+” - значения, безусловно представленные тетракодом; “~” - неопределенные значения, задаваемые символом А; “=” - одно из возможных альтернативных значений; “$\underline{a}$”, “$\underline{b}$”... - возможные альтернативные значения из наборов a, b...

Простейшие комбинации типа 000 или 001 отображаются на числовой оси единичными значениями соответственно как [+ - - - - - - -] или [- + - - - - - -] и т. п.

В случае использования символа множественности M значения на числовой оси генерируются путем последовательной подстановки вместо M значений 0 и 1. При этом осуществляется перебор всех возможных комбинаций таким образом, что количество одновременно кодируемых значений будет 2^m, где m - количество разрядов, содержащих M.

Например: 00M = [+ + - - - - - -]; 0M0 = [+ - + - - - - -]; 1MM = [- - - - + + + +].

Аналогично интерпретируется символ S, но с одним существенным различием: при подстановке значения 1 все разряды, расположенные правее данного, инвертируются, что соответствует симметричному отображению значений на числовую ось.

Например: 0S1 = [- + + - - - - -]; S01 = [- + - - - - + -]; SM0 = [+ + - - - - + +].

При использовании символа “возможно” $\underline{M}$ генерация конкретного значения осуществляется путем подстановки 0 или 1, выбираемых случайно для каждого из разрядов, содержащих $\underline{M}$ (как правило, при каждом использовании кода).

Например: 1$\underline{M}$1 = [- - - - - = - =]; $\underline{M}$0$\underline{M}$ = [= = - - = = - -]; M$\underline{MM}$ = [$\underline{a}$ $\underline{a}$ $\underline{a}$ $\underline{a}$ $\underline{b}$ $\underline{b}$ $\underline{b}$ $\underline{b}$].

Символ полной неопределенности A при каждом использовании содержащих его кодов может интерпретироваться по разному и в зависимости от конкретной ситуации может заменяться на какой-либо другой символ (0, 1, M, M, S и др.).

Например: 1AA= [- - - - ~ ~ ~ ~]; 01A→ 01$\underline{M}$ = [- - = = - - - -]; 00A→ 00M = [+ + - - - - - -]

Интерпретация символов I и O аналогична 1 и 0, но “с точностью до наоборот” и соответствует формуле “все значения кроме”.

Например: OOO = [- + + + + + + +]; 1I I = [- - - - + + + -]; O10 = [- - + - + + + +].

Символы D и R могут быть интерпретированы как “множественность с инверсией” и “симметрия с инверсией” соответственно.

Например: D01 = [- + - - + - + +]; R01 = [- + - - + + - +].

Выбор конкретного варианта гиперкода должен осуществляться исходя из особенностей решаемых задач. Так, например, для кодирования детерминированных структур, процессов и сигналов с наибольшей эффективностью могут использоваться тетракоды C_3^4= {1, 0, S, M}или октокоды C_1^8= {1, 0, M, R, O, S, I, D}. В случае же, когда объект кодирования характеризуется стохастичностью, наиболее целесообразно использование гиперкодов типа C_1^4= {1, 0, A, M}, C_2^4= {1, 0, $\underline{M}$, M}, C_4^4= {1,0,A,$\underline{M}$}, C_2^8={1,0, M, S, R, D, A, $\underline{M}$} или C_1^{16}= {1, 0, M, R, O, S, I, D, $\underline{1}$, $\underline{0}$, $\underline{M}$, $\underline{R}$, $\underline{O}$, $\underline{S}$, $\underline{I}$, $\underline{D}$}.

Таким образом, представление чисел в виде гиперкодов дает возможность гибкого задания различных наборов значений на числовой оси. По сравнению с обычным бинарным кодов количество бит, требуемых для кодирования чисел возрастает при этом не менее чем в $\log_2 K$ раз. Для представления тетракодов, например, требуется удвоенная длина кодовых слов. Однако повышение степени информативности получаемых за счет этого кодов вполне оправдывает увеличение затрат на кодирование. Экспериментально, в частности, доказана эффективность использования тетракодов для представления различных произвольных структур на примере кодирования изображений [9].

9. Основные направления дальнейших исследований и разработок

Для наиболее полного использования научного и инженерного потенциала предложенной концепции на первом этапе ее реализации представляются необходимыми следующие исследования и разработки:

- теоретическая проработка основных вопросов гиперлогики, что в обобщенной форме может быть сформулировано как обобщение теоретического аппарата классической алгебры логики до уровня гиперлогики;
- разработка инженерных методик, направленных на эффективное использование возможностей гиперлогики при разработке интеллектуальных вычислительных и информационных систем;
- теоретическая проработка вопросов гиперкодирования, в т.ч. разработка принципов использования гиперкодов в различных приложениях, алгоритмов кодирования и реализации основных операций, принципов и методов теоретической оценки эффективности гиперкодов;
- разработка конкретных приложений, в первую очередь, моделирующих систем, широко использующих преимущества гиперкодов;
- проработка вопросов аппаратной реализации гиперлогики и гиперкодов, в том числе разработка соответствующих инженерных методик.

Принципы гиперкодирования также могут быть эффективно использованы для синтеза существенно новых технических решений, подобных тем, которые предложены в работах [3, 4, 5, 6, 7] для систем, ориентированных на высокопроизводительное компьютерное моделирование.

Заключение

Предложенная концепция позволяет реализовать существенно новый подход к повышению эффективности методов и средств “вычислительного интеллекта”, суть которого состоит в интеграции преимуществ различных кодо-логических систем и получении за счет этого значительного синергетического эффекта. Возможности расширенного кодо-логического базиса первостепенное значение имеют для высокопроизводительного компьютерного моделирования сложных систем, где требуются развитые возможности достаточно компактного и формализованного представления информации о явлениях и объектах реального мира, с трудом поддающихся формализации.

Одной из важнейших областей применения расширенного кодо-логического базиса могут быть системы с нечеткой логикой. Во-первых, в случае предложенного трехмерного логического пространства мы, фактически, имеем расширенный вариант нечеткой логики, позволяющий совместить ее преимущества с возможностями гиперлогики. Во-вторых, гиперкоды являются удобным средством представления наиболее часто используемых трапецеидальных и треугольных функций принадлежности.

Литература

1. Аверкин А.Н. Мягкие вычисления - основа новых информационных технологий / В кн. "КИИ-96", Сборник научных трудов 5-й национальной конференции с международным участием "Искусственный интеллект - 96", т. 2, Казань, 1996, с. 237-239.
2. Аноприенко А.Я. Тетралогика и тетракоды. / В кн. "Сборник трудов факультета вычислительной техники и информатики". Вып.1. Донецк, ДонГТУ, 1996, с.32-43.
3. Аноприенко А.Я., *Устройство для вывода графической информации*. А.с.1403092 (СССР) / Опубл. 1988, БИ № 22.
4. Аноприенко А.Я., Башков Е.А., *Запоминающее устройство с многоформатным доступом к данным.* А.с. 1336109 (СССР) / Опубл. 1987, БИ № 33.
5. Аноприенко А.Я., Башков Е.А., *Запоминающее устройство с многоформатным доступом к данным*. А.с. 1355997 (СССР) / Опубл. 1987, БИ № 44.
6. Аноприенко А.Я., Башков Е.А., *Устройство для отображения графической информации на экране телевизионного индикатора*. А.с.1403091 (СССР) / Опубл.1988, БИ №22.
7. Аноприенко А.Я., Гриза В.А., *Запоминающее устройство с многоформатным доступом к данным*. А.с. 1624526 (СССР) / Опубл. 1991, БИ № 4.
8. Аноприенко А.Я., Кухтин А.А. *О некоторых возможностях расширения логического базиса информатики.* / В кн."Тези доповідей міжнародноі науково-практичноі конференціі "Інформатизація в умовах переходу до ринку", Київ, 5-6 листопада 1992 р., с. 30-32.
9. Анопрієнко О., Кривошеєв С. Тетракоди: новий метод кодування сигналів і зображень. / В кн. "Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів. Праці Всеукраїнської міжнародної конференції УкрОБРАЗ'96. Київ, 1996.
10. Апокин И.А., Майстров Е.М. Развитие вычислительных машин. - М.: Наука, 1974. - 399 с.
11. Верлань А.Ф., Дмитриенко В.Д. и др. Эволюционные методы компьютерного моделирования. - Киев: Наукова думка, 1992. - 256 с.
12. Белнап Н., Стил Т. Логика вопросов и ответов. - М., 1981. - 214 с.
13. Богомолов А.С. Античная философия. - М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1985, 368 с.
14. Бонгард-Левин Г.М. Древнеиндийская цивилизация. Философия, наука, религия. - М.: Наука, 1980, 333 с.
15. Бочвар Д. А. Об одном трехзначном исчислении и его применении к анализу парадоксов классического расширенного функционального исчисления. Математический сборник. 1938. Т. 4 (46). № 2.
16. Да услышат меня земля и небо: Из ведийской поэзии: Пер. с ведийск. - М.: Худож. лит., 1984, 270 с.
17. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике: Пер. с фр. - М.: Радио и связь, 1990. - 288 с.
18. Жданов Д.А. Возникновение абстрактного мышления. - Харьков: Издательство харьковского университета, 1969. - 174 с.
19. Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений. / В кн. "Математика сегодня", М., 1974.
20. Зверев Г. Н. Точные и аппроксимационные логики в машинных рассуждениях / В кн. "КИИ-96", Сборник научных трудов 5-й национальной конференции с международным участием "Искусственный интеллект - 96", т. 1, Казань, 1996, с. 46 - 49.
21. Ивахненко А.Г. Непрерывность и дискретность. Переборные методы моделирования и кластеризации. - Киев: Наукова думка, 1990. - 224 с.
22. Ильин В.В. Высокие информационно-вычислительные технологии. Вестник РАН, №6, 1996.
23. Кликс Ф. Пробуждающееся мышление. У истоков человеческого интеллекта. - М.: Прогресс, 1983. - 302 с.
24. Ларичев В. Е. Мудрость змеи: Первобытный человек, Луна и Солнце.-- Новосибирск: Наука, 1989.-- 272 с.
25. Маковский Н.Н. Лингвистическая генетика: проблемы онтогенеза слов в индоевропейских языках. - М.: Наука, 1992, 189 с.
26. Маковельский А.О. История логики. - М.: Наука, 1967. - 502 с.
27. Марков А.А. О логике конструктивной математики. Вестник МГУ. Сер. "Математика, механика". 1970. № 2. С. 13.
28. Пипуныров В. Н. История часов с древнейших времен до наших дней. - М.: Наука, 1982, 496 с.

29. Раушенбах Б.В. Логика троичности. / В кн. “Пристрастие”. - М.: Издательство “Аграф”, 1997, с. 117-129.
30. Ригведа. Мандалы I - IV. - М.: Наука, 1989. - 767 с.
31. Санжаров С.Н. Погребения донецкой катакомбной культуры с игральными костями. Советская археология, №1, 1988. - с.140-158.
32. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. - К., Техніка, 1975, 768 с.
33. Словарь по кибернетике. Под ред. В.С. Михалевича. - К.: Гл. Ред. УСЭ им. М.П. Бажана, 1989, 751 с.
34. Стахов А.П. Коды золотой пропорции. - М.: Радио и связь, 1984. - 152 с.
35. Стройк Д. Я. Краткий очерк истории математики. - М.: Наука, 1984, 282 с.
36. Ульянов С.В. Нечеткие модели интеллектуальных систем управления: теоретические и прикладные аспекты (обзор). Техническая кибернетика, № 3, 1991, с. 3-28.
37. Фоли Дж. Энциклопедия знаков и символов. - М.: Вече, АСТ, 1996. - 432 с.
38. Четвериков В.Н., Баканович Э.А. Стохастические вычислительные устройства систем моделирования. - М.: Машиностроение, 1989, 272 с.
39. Яглом И.М. Математические структуры и математическое моделирование. - М.: Сов. Радио, 1980. - 144 с.
40. Lukasiewicz J. Aristotle’s Syllogistic from the Standpoint of Modern Formal Logic. Clarendon Press. Oxford, 1957.
41. Lukasiewicz J. O pojeciu mozliewosci. - Ruch Filozoficzny. Lwow. 1920. R. 5. № 9.
42. Heise W., Quattrocchi P. Informations- und Codierungstheorie. Mathematische Grundlagen der Daten-Kompression und -Sicherung in diskreten Kommunikationssystemen. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1995, 476 z.
43. Peitgen H.-O., Hartmut J., Saupe D. Chaos and fractals: new frontiers of science. Springer-Verlag, 1992, 984 p.
44. Post E. L. Introduction to a General Theory of Elementary Propositions. American Journal of Mathematics. 1921. Vol. 43. № 3.
45. Reichenbach H. Philosophical Foundations of Quantum Mechanics. Berkeley - Los Angeles, 1946.
46. Reuter A. Grenzen der Parallelitaet (Limitations of Parallelism). Informationstechnik, 34 (1992) 1, z. 62-74.
47. Schoneburg E., Heinzmann F., Feddersen S. Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien: Eine Einfuehrung in Theorie und Praxis der simulierten Evolution. Addison-Wesley, 1994, 481 z.
48. Zadeh L.A., Fuzzy Sets. Information and Control, June 1965, pp. 338-353.
49. Zadeh L. A. Soft computing and Fuzzy Logic. Software Engineering Journal, November, 1994.
50. Zadeh L. A. Fuzzy Logic = Computing with Words. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 4, No. 2, May 1996, p. 103-111.

Как правильно ссылаться на эту статью:

Аноприенко А.Я. Расширенный кодо-логический базис компьютерного моделирования / В кн. «Информатика, кибернетика и вычислительная техника» (ИКВТ-97). Сборник научных трудов ДонГТУ. Выпуск 1. Донецк, ДонГТУ, 1997, с. 59-64.