

УДК 165.4

В. В. Целищев

Институт философии и права СО РАН
ул. Николаева, 8, Новосибирск, 630090, Россия

Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: director@philosophy.nsc.ru

СЕМАНТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗНАНИЯ*

В работе рассматривается задача формализованного представления знания, возникающая в связи с попытками автоматизации извлечения нового знания с помощью вычислительных процедур. В качестве важнейшей проблемы, которая может быть решена на основе определения информативности дедуктивного вывода, рассматривается соотношение семантики и синтаксиса в представлении знания. В качестве наиболее продуктивного средства решения указанных проблем предлагается теория дистрибутивных нормальных форм, позволяющая измерять информативность дедуктивного рассуждения и тем самым дает основание для решения проблемы соотношения синтаксической и семантической компонент в представлении знания.

Ключевые слова: представление знания, семантика и синтаксис, информация, дистрибутивные нормальные формы.

Синтаксические структуры в представлении знания

В классическом случае при формализации знания компьютер является «подчиненным» или «ведомым» в том смысле, что ему сообщается знание, которым обладает человек. При этом первостепенное значение приобретает язык, на котором происходит общение с компьютером. Такой язык, с соответствующей семантикой, в совокупности с реакцией компьютера и образуют представление и мыслительную систему (representation and reasoning system – RRS).

Исследования в области так называемого представления знания есть попытка автоматизировать процесс извлечения нового знания с помощью компьютерных технологий. В первую очередь тут имеется в виду алгоритмизация мышления, т. е. частичная передача когнитивных способностей человека компьютеру. При такой попытке, как правило, возникают проблемы, связанные с тем, что компьютер представляет собой чисто

синтаксическое устройство, в то время как когнитивные способности простираются в область семантики, семиотики и прагматики. Таким образом, при любой программе исследований представления знания мы должны осуществить какого-то рода редукцию семантических и семиотических структур к синтаксическим.

Такого рода редукция осуществляется путем наложения двух частей знания – формального языка и эмпирических данных. При этом язык играет чисто вспомогательную роль, которая сводится к тому, чтобы сообщить компьютеру необходимые эмпирические сведения. «Система мышления» в представлении знания понимается как достаточно простой язык, в котором возможна формализация семантики, которая в определенном смысле ничем не отличается от синтаксиса. От дедуктивных структур, лежащих в основе «системы мышления», не требуется слишком многого, за исключением стандартных добродетелей вроде полноты. Естественно, что при этом собственно знание

* Исследования, представленные в этой работе, поддержаны Междисциплинарным интеграционным грантом Сибирского отделения РАН №. 47.

должно быть продуктом чисто эмпирических данных.

Однако следует обратить внимание на тот факт, что достаточно богатые языки сами по себе могут быть источником знания. Дело в том, что язык может пониматься как «кантианская сеть», набрасываемая на мир, и получающееся в результате знание есть продукт двух источников – эмпирических знаний и собственно языкового вклада. Согласно Канту, в принципе невозможно разделить в реальном знании эти два компонента. Более точно, если новое знание измеряется некоторой семантической информацией, тогда трудно разделить семантическую информацию, получающуюся в результате анализа языковых структур, и информацию от эмпирических наблюдений.

Если принять тезис, согласно которому дедуктивные структуры обладают семантической информацией, тогда представление знания не есть процесс чисто извлечения эмпирического содержания, процесс, в котором язык играет лишь вспомогательную роль. Формальный язык, используемый для представления знания, предстает как самостоятельный фактор. Это обстоятельство принимает еще более радикальное значение, если учесть, что «система мышления» не есть просто метафора, а является точным названием того, что происходит в процессе алгоритмизации мышления. Этот процесс может привести к «самосознанию» компьютера. В более прозаических терминах это означает наличие в логических системах рефлексивных особенностей. Тогда вклад языка, или формальной системы, в знание, является по-настоящему значительным.

Здесь возникает новый интересный аспект соотношения эмпирического и дедуктивного знания. Дело в том, что структура языка для представления определенного фрагмента знания может быть избыточно богатой, следствием чего является то, что в таком языке можно сформулировать вопросы, которые не относятся к исходному фрагменту знания, представлением которого мы занимаемся. Между тем такие вопросы имеют вполне «законный» вид, но на самом деле являются псевдвопросами. Это еще один фактор, который говорит о важности языка при исследовании представления знания.

Коль скоро «система мышления» есть дедуктивная структура, возникает вопрос,

обладают ли дедуктивные структуры семантической информацией. Другой вопрос состоит в том, в каком смысле формальная система может быть «разумной». Каждый из этих вопросов требует исследования, которое позволило бы понять мощь чисто синтаксических методов.

Фактически исследование о существовании семантической информации у дедуктивных структур есть исследование того, являются ли данные структуры аналитическими или синтетическими. Эта традиционная формулировка является вполне адекватной для поставленных нами целей, но ответ на этот вопрос следует искать в таких представлениях, где семантика предельно «синтаксизирована», т. е. возникает при самых простых допущениях синтаксического толка. Традиционно семантика задается через концепцию указания термином языка объекта. Но дело в том, что именно теория указания является весьма спорной, и в настоящее время имеется несколько очень серьезных альтернатив, любой из которых трудно отдать предпочтение. Причиной столь сложного положения дел является то обстоятельство, что с виду простая процедура указания представляется сложнейшим когнитивным процессом, объяснение которого зависит от теории языка. Но, как известно, теории языка в существенной степени зависят от логических концепций, которые, в свою очередь, зависят от массы других концепций. Все это требует обращения к самой простой, желательной комбинаторной концепции соотношения синтаксиса и семантики. Такой концепцией является теория дистрибутивных нормальных форм в первопорядковой логике, предложенная Г. фон Вригтом и разработанная Я. Хинтикой.

Вопрос о «разумности» формальной системы представляется вполне адекватным при применении к анализу понятия доказательства модальной логики. В интересной системе возможно смешение синтаксического и семантического уровней языка, что и позволяет сделать машину разумной. Естественно, что не следует ожидать полной «разумности» от машины; скорее, речь может идти о том, какие ресурсы языка задействованы и какого рода рефлексии можно ожидать от машины. Если такая рефлексия имеет место даже на самом элементарном уровне, это означает, что при представлении

знания мы не имеем права не учитывать вклада от знания машины своего «мышления».

В целом можно считать, что при исследовании проблемы представления знания, как она понимается в настоящее время, мы решаем задачу обратную. Если обычно эмпирические факты напрямую «накачиваются» в формальную теорию, то в нашем случае эти эмпирические факты являются скорее следствием принятых ограничений на используемый при представлении знания язык.

Понятие семантической информации в дистрибутивной нормальной форме

Понятие семантической информации было введено Р. Карнапом и И. Бар-Хиллелом [Bar-Hillel, Carnap, 1953]. Любое утверждение несет некоторую информацию, в самом широком смысле этого слова. Этот смысл также влечет, что одни предложения более информативны, чем другие. Если такая попытка упорядочения правомерна, нужно предложить меру семантической информации. Один из способов изменения предложения в статистической теории информации. К. Шеннон предложил считать, что информация есть устранение неопределенности [1963]. Исходная ситуация, подвергающаяся описанию, представляется в виде совокупности альтернатив, которые могут рассматриваться как мера неопределенности. Всякое информативное описание утверждает одни альтернативы и исключает другие. Чем больше альтернатив предложение исключает, тем более оно информативно. Предложению S можно приписать определенную вероятность $P(S)$, и относительное число исключаемых предложением альтернатив можно считать мерой информативности предложения. Тогда информация, содержащаяся в предложении S :

$$\text{inf}(S) = 1 - P(S)$$

или же $-\log P(S)$.

Семантическая информация, которую несет предложение s , по определению полагается его содержанием (Cont). Это множество возможных миров, которые делают предложение s ложным. Другими словами, это множество возможных миров, которые исключаются предложением s . Для любого логически истинного предложения h , которое не исключает ни одной альтернативы:

$$\text{Cont}(h) = \emptyset.$$

Эта идея не дает меры семантической информации. Интуитивно ясно, что информативность предложения обратно пропорциональна вероятности состояния дел, которое описывается предложением. Предложение s имеет определенную вероятность $p(s)$, и получается эта вероятность через априорное распределение вероятностей во множестве возможных миров. Тогда

$$\text{Cont}(s) =_{\text{Df}} 1 - p(s).$$

Поскольку конститuentы описывают определенные альтернативы, им приписывается некоторая вероятность. Если предложение s есть дизъюнкция альтернатив, то

$$p(s) = \sum_i p(C_i).$$

Приписывание весов конститuentам в общем случае кванторной логики является гораздо более сложным делом, чем в случае пропозициональной логики или монадического исчисления предикатов. Как и в случае пропозициональной логики, мы полагаем, что противоречивые конститuentы не имеют веса и не вносят вклада в информативность предложения. Для предложения s в дистрибутивной нормальной форме мы имеем

$$p(s) = \sum_i^n p(C_i^d),$$

если C_i^d является непротиворечивой. Но само по себе это определение не является однозначным, поскольку с его помощью определяются два вида семантической информации – глубинная и поверхностная. Для реализации предположения о непротиворечивости C_i^d нужно принять другое предположение, а именно о том, какая информация является реалистической с точки зрения эпистемической логики.

При попытке дать более точное определение информации нужно понять, как описываются упомянутые выше альтернативы. Описание осуществляется в логическом языке, и, по многим соображениям, наиболее подходящим языком для целей представления знания является язык первого порядка.

Каждая непротиворечивая формула P пропозициональной логики имеет нормальную форму, представляющую собой дизъюнкцию определенных конъюнкций, называемых конститuentами. Пусть в формулу P входят атомарные формулы p_1, p_2, \dots, p_k . Эти формулы описывают факты действительного мира. Соединение фактов в более общее описание отражается в комбинации

утверждений и отрицаний атомарных формул, т. е. в их конъюнкции, или конституенты.

Пусть формулы p_1, p_2, \dots, p_k входят в формулу P . Тогда конституента в нормальной форме содержит для каждого $i = 1, 2, \dots, k$, либо утверждение $+p$, либо его отрицание $-p$, но не оба вместе. Произвольная конституента представляет собой конъюнкцию различных сочетаний утверждений и отрицаний атомарных формул. Таким образом, общий вид конституенты таков:

$\pm p_1 \& \pm p_2 \& \dots \& \pm p_i \& \dots \pm p_k$
или же, сокращенно:

$$\prod_{i=1}^k p_i.$$

Ясно, что может быть 2^k таких конституент.

Если одна из конституент оказывается истинной, тогда истинно все предложение, т. е. одна из возможностей реализуется в действительном мире. Логически истинное предложение, или тавтология, допускает все возможности, и поэтому не исключает ни одной из них. Тем самым оно не несет никакой информации. Этот вывод играл чрезвычайно важную роль при формировании школы логического позитивизма, представители которой в то время находились под влиянием концепции Витгенштейна о тавтологическом характере логики.

Интересно отметить, что концепция семантической информации для случая пропозициональной логики представляется не очень важной в том отношении, что более значительным случаем является кванторная логика. Если бы удалось определить понятие семантической информации для кванторов, тогда можно было бы считать, что это определение автоматически распространяется на пропозициональную логику. Но такое предположение натывается, как мы позднее увидим, на серьезные затруднения, что ставит под сомнение саму возможность корректного определения семантической информации.

Итак, пропозициональная логика представляет собой лишь фрагмент логики первого порядка и основная проблема состоит в перенесении концепции семантической информации на кванторную логику. Такая попытка была предпринята Р. Карнапом. Из некоторого фиксированного набора свободных сингулярных терминов и предикатов образуются элементарные предложения, составляющие саму основу описания. Аналог конституенты в пропозициональной ло-

гике включает в описание состояния предикаты и переменные. Каждое описание состояния обладает некоторым весом, т. е. определенной вероятностью реализации этого состояния. Семантическая информация тогда есть сумма весов тех описаний состояния, которые исключаются данным предложением. Однако этому методу Карнапа присущи некоторые существенные недостатки. Во-первых, элементарные предложения, специфицированные в каждом описании состояния, должны быть логически независимы, а значит, должны быть независимы предикаты и индивиды, что крайне нереалистично. Во-вторых, этот метод предполагает полную спецификацию всех индивидов, участвующих в описании состояния, а значит, мы должны иметь полное знание о размере универсума рассмотрения. Изменение этого размера, т. е. числа индивидов, влечет изменение важных характеристик предложения, в частности семантической информации предложения. Это уже эпистемологический порок, потому что он искажает характер научного познания. В реальной ситуации познания универсум не является четко фиксированным, и прогресс в познании как раз состоит часто в открытии новых индивидов. Подобная зависимость от априорного полагания числа индивидов есть существенный недостаток. Но самое главное состоит в том, что понятие семантической информации отличается рядом странностей. Так, информация утверждения о существовании некоторого индивида становится малой по ходу увеличения размера универсума, хотя интуитивно ясно, что в большем универсуме найти индивид труднее, и поэтому информация утверждения о существовании индивида становится большей, чем при меньшем универсуме.

Дистрибутивные нормальные формы логики первого порядка

Для понимания того, какого рода альтернативы представлены в каждом утверждении, или более точно, как эти альтернативы представлены в логическом языке, нужно представить эти альтернативы в эксплицитном виде, так чтобы каждой альтернативе соответствовало некоторое логическое выражение. При некоторых ограничениях такая возможность дается представлением предложений в дистрибутивной нормальной

форме. Любое предложение логики первого порядка характеризуется рядом параметров, одним из которых является так называемая глубина предложения, а именно, максимальное число кванторов, области действия которых пересекаются, т. е. вложенных кванторов. Ограничение, о котором говорилось выше, состоит в том, что всегда рассматриваются такие средства кванторной теории (конечный перечень предикатов и свободных индивидуальных переменных, кванторы и пропозициональные связки), степень которых меньше некоторого заданного положительного числа. В этом случае можно перечислить все возможные миры относительно некоторого универсума рассмотрения.

Поскольку использование квантора подразумевает введение в рассмотрение индивида, и если области действия двух кванторов в некотором предложении не пересекаются, мы считаем, что эти два квантора вводят в рассмотрение два индивида. Предложение кванторной теории с комбинаторной точки зрения выражает свойства и отношения тех индивидов, которые вводятся свободными переменными, а также индивидов, которые вводятся кванторами. Введение кванторов позволяет получить более подробную информацию о мире, поскольку при таком описании положение дел в мире фиксируется утверждением о существовании или несуществовании индивидов с определенными свойствами.

Основной результат Хинтикки в отношении дистрибутивных нормальных форм состоит в том, что каждое непротиворечивое кванторное предложение может быть представлено в нормальной форме, представляющей собой дизъюнкцию некоторых конъюнктов, каждая из которых описывает определенную альтернативу (см.: [Целищев, 2010]). Пусть имеется k свойств и некоторые могут быть приписаны индивиду. Эти свойства представлены одноместными предикатами

$$P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_k.$$

Средствами этих предикатов можно образовать сложные предикаты через конъюнкцию утверждений или отрицаний исходных предикатов P_i . Индивид характеризуется сложным предикатом, общий вид которого следующий:

$$\pm P_1 \& \pm P_2 \& \dots \& \pm P_i \& \dots \& \pm P_k.$$

Сокращенно этот предикат может быть представлен в виде

$$\prod_{i=1}^k P_i x.$$

Таких сложных предикатов из k одноместных предикатов можно построить 2^k . Некоторое возможное положение дел в мире характеризуется существованием индивидов, обладающих некоторыми из этих сложных свойств, представленных соответствующими предикатами, и несуществованием индивидов, которым можно приписать остальные предикаты из перечня 2^k предикатов. Другими словами, относительно каждого из сложных предикатов можно утверждать существование индивида, обладающего таким предикатом, либо отрицать существование такого индивида. Это обстоятельство выражается формулой

$$\pm (\exists x) \prod_{i=1}^{j=k} P_i x.$$

Ясно, что таких выражений может быть

$$\prod_{i=1}^{j=2^k} \pm (\exists x) \prod_{i=1}^{j=k} P_i x.$$

По аналогии с пропозициональной логикой можно ввести нормальную форму, которая представляет собой дизъюнкцию таких конъюнктов. Обозначим те части этого выражения, которые утверждают существование индивидов, через $C_i(x)$. Тогда последняя формула может быть переписана в форме, где $C_i(x)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) есть некоторое подмножество указанного множества предикатов.

Монадическое исчисление предикатов, для которого была определена дистрибутивная нормальная форма, служит «матрицей» для перехода к предикатам с большим числом переменных. Рассмотрим случай конъюнкты для кванторной теории с двумя переменными. При переходе к двухместным предикатам $P(x,y)$ конъюнкта имеет тот же вид, что и конъюнкта для монадического исчисления. Изменение касается теперь уже вида конъюнкций $C_i(x)$. Дело в том, что при переходе к двухместным предикатам резко усложняется спецификация различного рода индивидов. Каждая из $C_i(x)$ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & (\exists y) C^1(x,y) \& (\exists y) C^2(x,y) \& \dots \& (\exists y) \\ & C^i(x,y) \& \dots \& (\exists y) C^n(x,y) \& \\ & \& (\forall x) [C^1(x,y) \vee C^2(x,y) \vee \dots \vee C^i(x,y) \\ & \vee \dots \vee C^n(x,y)] \& \\ & \& \prod_{i=1}^{i=r} P_i(x,x), \end{aligned}$$

а каждая из $C^j(x,y)$ имеет вид

$$\prod_{i=1}^{i=r} R_i(x,y) \& \prod_{i=1}^{i=r} R_i(y,x) \& \prod_{i=1}^{i=r} R_i(y,y).$$

Несмотря на кажущуюся сложность последнего выражения, интуитивно его легко понять. Конъюнкция вида $C'(x, y)$ описывает все возможные виды индивидов, которые могут иметь отношение к некоторому фиксированному индивиду x . Затем для каждого такого индивида y утверждается или отрицается его существование, что выполняется уже всем последним выражением, кроме последней части, которая призвана описать, как индивид x соотносится с самим собой.

Определив конститuentы подобным образом, мы можем перечислить все возможности имеющимися в нашем распоряжении средствами языка. Логически истинное предложение кванторной теории будет тавтологией, если оно перечисляет все возможности. Последнее обстоятельство должно быть видно из дистрибутивной нормальной формы предложения: она должна содержать все конститuentы, и в этом случае предложение несет нулевую информацию.

Это заключение приводит к чисто философским затруднениям. Дело в том, что, при всем разном в понимании роли дедукции в представлении знания, практически всеми признается важнейшая роль логики. Но заключение о безынформативности логических истин ставит вопрос о том, каким же образом получается новое знание. Здесь мы наталкиваемся на ключевой вопрос о природе представления знания. Если полагать, что математика есть представление знания, а сама математика безынформативна, тогда что собственно и как она представляет? Остается предположить, что заключение о безынформативности дедуктивных структур было слишком поспешным, хотя и основывалось на довольно сильных аргументах. Эти аргументы фактически совпадают с определением информации, так что нужно найти такие обстоятельства, при которых понятие семантической информации требует более тонкого анализа. Долгое время этот анализ блокировался философской традицией и авторитетом Венского Кружка и Витгенштейна.

Рассмотрим то обстоятельство, в какой степени заключение о безынформативности логики, а также математики диктуется самим определением понятия семантической информации. Коль скоро информация связывается с наличием альтернатив, а приобретение информации – с устранением альтернатив, наилучшим средством анализа

будет такое представление информации, при котором будут выписаны в явном виде все альтернативы. Дистрибутивные нормальные формы являются самым лучшим кандидатом для такого анализа. С первого взгляда, именно дистрибутивные нормальные формы говорят о том, что логические истины являются тавтологиями. Однако более тщательный анализ показывает, что дело осложняет процесс устранения конститuent. Во-первых, в утверждении, представленном в дистрибутивной нормальной форме, мы удаляем конститuentы, которые не соответствуют действительному положению дел, и именно на этом пути утверждение становится информативным. Поскольку логика описывает все возможности, с первого взгляда кажется, что в логическом утверждении нечего вычеркивать совсем. Однако оказывается, что даже в логическом выражении, представленном в дистрибутивной нормальной форме, удаляются конститuentы. Дело в том, что некоторые конститuentы являются противоречивыми. Видимо, имеет смысл считать, что противоречивые утверждения не описывают ничего, так что их вычеркивание вполне обоснованно.

Появление противоречивых конститuent показывается следующим образом. Выражения (3) и (4) являются перечнями всех существующих для данного описания индивидов. Первый перечень является «абсолютным», или первичным. Второй список – это перечень тех индивидов, которые определяются относительно индивидов из абсолютного перечня. Итак, второй перечень является частью первого, и более высокая его степень говорит о более подробной характеристике индивида x , в том смысле, что учитываются его связи с другими индивидами. При переходе от абсолютного перечня к относительному степени 2, а затем к конститuentам степени 3 и так далее, получается все более целая картина взаимоотношений индивидов действительного мира, и как раз в этом случае увеличивается знание. Каждый индивид из абсолютного перечня должен найти свое место в соответствующих перечнях более высокой степени, и обратно, каждый индивид из относительных перечней должен найти свое место в абсолютном перечне. Другими словами, каждые два перечня должны быть совместимы для соответствующих конститuent. Однако требование совместимости может нарушаться,

и в этом случае получают противоречивые конститuentы, причем противоречивость их может быть скрытой, или неявной, и выявляется она при переходе к конститuentам более высоких степеней.

Два вида семантической информации

Определение того, является ли конститuent дистрибутивной нормальной формы противоречивой, возможно путем расписывания конститuent в дизъюнкцию конститuent большей глубины. Это обстоятельство играет значительную роль в философской интерпретации аппарата дистрибутивных нормальных форм. Пусть имеется некоторое выражение, записанное на языке кванторной теории. По теореме Черча, логика первого порядка неразрешима, т. е. не существует эффективной процедуры для распознавания того, является ли данная формула логически истинной. Любая формула может быть представлена в дистрибутивной нормальной форме до требуемой глубины d , так чтобы d было меньше наперед заданного конечного положительного числа. Чтобы узнать, является ли данная формула глубины d истинной, нужно иметь способ распознавания противоречивых конститuent глубины d . Если такой метод существует, тогда все противоречивые конститuent опускаются, и оставшееся выражение будет истинным. Другими словами, проблема разрешимости эквивалентна проблеме решения того, какие конститuent противоречивы.

Рассмотрим структуру конститuent глубины d . Она представляет дерево в математическом смысле слова, и его элементами являются конститuent меньшей, чем d , глубины. Противоречивость конститuent C_0^d может означать, что противоречива конститuent меньшей глубины C_1^{d-1} , которая в свою очередь противоречива из-за противоречивости конститuent C_1^{d-2} и т. д. В конце этого процесса мы можем найти противоречивую конститuentу C_j^{d-e} , которая и ответственна за противоречивость конститuent C_0^d . Это есть тривиальный случай противоречивости конститuent, и противоречивость подобного рода легко обнаруживается для всех противоречивых конститuent.

Но противоречивость конститuent C_0^d может быть нетривиальной, т. е. C_0^d может быть противоречивой, а все конститuent некоторой меньшей глубины $c < d$ непроти-

воречивыми. Метод распознавания нетривиально противоречивых конститuent заключается в расписывании конститuent в дизъюнкцию конститuent большей глубины. Процесс, в некотором смысле обратный случаю тривиальной противоречивости расписывания, дает другие конститuent, подчиненные данной. Процедура расписывания, примененная к каждой получаемой конститuentе с большей, чем исходная конститuent, глубиной, может продолжаться сколь угодно долго до некоторого заданного конечного числа. Имеются довольно простые критерии противоречивости, так что для нетривиально противоречивой конститuent существует такая глубина, что все подчиненные ей конститuent противоречивы по критерию тривиальной противоречивости. Но это вовсе не значит, что мы при этом имеем разрешающую процедуру, что противоречило бы теореме Черча о неразрешимости логики первого порядка. Поскольку невозможно заранее знать, до какой глубины надо продолжать расписывание подозреваемой в противоречивости конститuent, разрешающей процедуры нет. Таким образом, данная формула в дистрибутивной нормальной форме может оказаться логической истиной, если в ней опущены все противоречивые конститuent. Для заданной глубины это можно сделать всегда, но при этом у нас нет никакой гарантии, что оставшиеся конститuent непротиворечивы, поскольку их противоречивость может обнаруживаться при расписывании их до большей глубины.

Вернемся к понятию семантической информации, которую несет предложение в дистрибутивной нормальной форме. Эта информация определяется как сумма весов тех непротиворечивых конститuent, которые исключаются данным предложением. Опускание противоречивых конститuent на меру семантической информации не влияет, поскольку противоречивые конститuent не отражают фактов действительного мира. Но по теореме Черча мы не можем утверждать, что данное выражение в дистрибутивной нормальной форме глубины d не содержит противоречивых конститuent, противоречивость которых можно было бы обнаружить расписыванием конститuent до глубины $d + e$ (неразрешимость состоит в том, что неизвестно, каким должно быть e). Это значит, что некоторой противоречивой консти-

туенте может быть ошибочно приписан некоторый вес, вносящий свою долю в меру семантической информации, которую несет предложение, тогда как на самом деле эта конституента не исключает никакой возможности. Однако это обстоятельство не является особенно беспокоящим, поскольку достаточно большое число d позволяет ожидать, что противоречивая конституента будет обнаружена. Я. Хинтикаа показал, что для каждой противоречивой конституенты глубины d существует e такое, что на глубине $d + e$ будет показана ее противоречивость [Целищев, 2010]. Это означает, что семантическая информация предложения представляет для нас нечто завершенное.

При таком понимании семантической информации, которая называется глубинной информацией, истины логики не несут информации, т. е. являются тавтологиями. Но для того чтобы осознать эту тавтологичность, нужно рассмотреть все, что логика может «выжать» из предложения, т. е. требуется принять во внимание всю логическую систему, в которую входит предложение. Невозможность решить, какое предложение, записанное на языке системы, является непротиворечивым, делает понятие глубинной информации малоприменимым, когда полный анализ предложения не представляется необходимым или возможным, например, в эмпирических исследованиях.

При определении и глубинной информации вес не приписывается не только противоречивым конституентам, но и всем конституентам, чья противоречивость обнаруживается при их расписывании до определенной глубины. Представляет интерес такой подход, когда несомая предложением семантическая информация определяется приписыванием веса всем конституентам предложения, кроме тривиально противоречивых. Этот вид семантической информации называется поверхностной информацией.

Оба вида информации в некоторых отношениях представляют собой разительный контраст. Если мы имеем в виду глубинную информацию, предложение q является следствием предложения p , если и только если дистрибутивная нормальная форма p есть часть дистрибутивной нормальной формы q . Глубинная информация предложения p не бывает меньше глубинной информации предложения q . В самом деле, если q утвер-

ждает больше возможных описаний состояния, чем p , то это за счет того, что q отрицает меньше описаний состояния. Семантическая информация есть сумма весов конституент, которые характеризуют исключенные описания состояний, и поэтому следствие q имеет меньшую глубинную информацию, чем p .

В случае поверхностной информации положение иное. Следствие q может иметь больше не только утверждаемых, но и отрицаемых конституент, поскольку таковыми могут быть нетривиально противоречивые конституенты, которым приписывается (ошибочно) некоторый вес. Поверхностная информация некоторого предложения глубины d имеет тенденцию, при некоторых естественных условиях, увеличиваться при расписывании этого предложения до глубины $e + d$, приближаясь к глубинной информации. При бесконечно большом e глубинная информация является пределом величины поверхностной информации.

Вопрос о выявлении противоречивых конституент – главный в техническом плане. В цепи философских концептуализаций он является промежуточным в определении двух типов семантической информации. Все логические истины – глубинные тавтологии, но не все являются поверхностными тавтологиями. Тем более это можно сказать о математических истинах. Решить однозначно философский вопрос на основании предпочтения глубинной информации по сравнению с поверхностной или наоборот, не представляется возможным. Но с точки зрения эпистемической этот вопрос решается в пользу поверхностной информации, поскольку процесс получения семантической информации – явно эпистемологическая процедура.

Самым важным тут является то обстоятельство, что поверхностная семантическая информация позволяет понять, каким образом дедуктивные структуры могут быть представлением знания. Дело в том, что следствие может быть информативнее в этом смысле посылки. Именно это объяснение полезности априорных истин является основным результатом в проблеме представления знания логикой и математикой.

В частности, это позволяет решить проблему эпистемического статуса объяснения. Концепция поверхностной информации является ключевой при представлении знания.

В частности, важнейшая часть знания – объяснение. Существенной чертой процедуры объяснения является то обстоятельство, что само по себе объяснение не добавляет фактической информации, которое содержится в объясняемом. Тогда в чем же состоит роль объяснения в получении знания?

Рассмотрим ситуацию, в которой предложение G есть следствие предложения F . Пусть оба предложения представлены в дистрибутивной нормальной форме. Если следствие имеет место, тогда все конstituенты G должны быть среди конstituент F . Если же есть такие конstituенты в G , которые не входят в перечень конstituент F , тогда они должны быть противоречивыми. Устранение противоречивых конstituент имеет интересные следствия для информативности предложения F . Если речь идет о глубинной информации, заключенная в F информация не изменяется, но если речь идет о поверхностной информации, тогда эта информация увеличится.

Есть два рода причин, по которым противоречивые конstituенты играют определенную роль в процедуре объяснения. Прежде всего, мы должны выяснить, какие индивиды, существующие в модели F , позволяют построить модель G , и как индивиды в модели G соотносятся с индивидами модели F . Если мы это выясним, тогда поймем, почему именно предложение G есть следствие предложения F . Если мы хотим получить G через истинность F , прибегаем к интерполяционной формуле, которая говорит, какие именно индивиды должны быть созданы или введены для этой цели, и как эти индивиды соотносятся с другими индивидами из исходной модели. Именно такая процедура позволяет объяснить, почему необходимо, что истинность F делает истинным G .

По аналогии с определением семантической информации для пропозиционального случая, примем, что для ее вычисления надо знать соответствующие вероятности. Формулы пропозициональной логики в дистрибутивной нормальной форме, как и формулы монадического исчисления предикатов, могут быть представлены в виде дизъюнкции конstituент, которые имеют вид

$$(\exists x) C_1(x) \& (\exists x) C_2(x) \& \dots \& (\exists x) C_i(x) \& \dots \& (\exists x) C_n(x) \& (\forall x) [C_1(x) \vee C_2(x) \vee \dots \vee C_i(x) \vee \dots \vee C_n(x)].$$

Пусть $\{C_{i1}, C_{i2} \dots C_{iw}\}$ есть подмножество всех конstituент этого типа. Тогда мы имеем

$$\text{Inf}(s) = C_{i1} \vee C_{i2} \vee \dots \vee C_{iw}.$$

Иначе говоря, дистрибутивная нормальная форма предложения s есть дизъюнкция всех конstituент, которые влекут s . Какие конstituенты не включены в перечень выше? Это противоречивые конstituенты, несовместимые с s . Рассмотрим противоречивое предложение r . Его дистрибутивная нормальная форма будет содержать 0 конstituент. Другими словами, мы просто не имеем формулы, и вполне естественно постулировать, что в этом случае искомая формула будет просто \perp . Это полностью совпадает с интуитивным предположением, что противоречивая формула есть \perp .

Хинтиikka определяет поверхностную информацию через понятие поверхностной вероятности. Эта вероятность вычисляется через распределение меры вероятности, которая приписывается каждой конstituенте, которая не является тривиально противоречивой. Это означает, что вес будет приписан каждой непротворечивой конstituенте, а также то, что он может быть приписан противоречивым конstituентам, противоречивость которых не обнаруживается на данном уровне расписывания конstituент. Другими словами, речь идет о приписывании весов нетривиально противоречивым конstituентам. Рассмотрим эту ситуацию с теоретико-множественной точки зрения. Пусть s и s' обозначают два предложения логики первого порядка, и предположим также, что предложение s имеет глубину d и представляет собой дизъюнкцию предложений той же глубины S . Иными словами, $s = \vee S$. То же относится и к s' и соответственно к S' . Далее, предположим, что $S \subset S'$. Обозначим через $X = S' / S$ (множество элементов S' , которые не являются элементами S), которое содержит только противоречивые конstituенты. В этом случае

$$p(s) = p(s'),$$

и следовательно,

$$\text{inf}(s) = \text{inf}(s').$$

Здесь речь идет, конечно, о глубинной информации. Вопрос состоит в том, можем ли различить два предложения с точки зрения семантической информации, если рассматриваем s и s' только с синтаксической точки зрения. Если хотя бы одна конstituента из X является нетривиально противоречивой,

тогда равенство семантических информации не может быть гарантировано. Синтаксическое рассмотрение в случае дистрибутивных нормальных форм принимает особенно простой вид. Предположение $S \subset S'$ означает, что с первого взгляда s' допускает больше возможностей, чем s , и поэтому содержит меньше информации. Вот такое понимание «кажущейся» информации есть то, что называется поверхностной информацией.

Как уже было указано, для любой конституенты глубины d из множества X существует такое число $e > d$, что может быть показана противоречивость всех конституенты глубины e . Это будет тогда, когда все подчиненные конституенты глубины e будут тривиально противоречивы. При переходе от глубины d к глубине e кажущиеся возможности, т. е. элементы X , которые не могут быть отличены от истинных возможностей глубины d , оказываются кажущимися возможностями глубины e . Поверхностная информация есть результат такого устранения кажущихся возможностей.

Мера глубинной вероятности, приписываемая конституенте C^d , распределяется между всеми непротиворечивыми конституентами, подчиненными C^d , а именно, конституентами глубины $d + 1$. С поверхностной вероятностью ситуация иная, поскольку вес приписывается и нетривиально противоречивым конституентам. Если C^d – нетривиально противоречивая конституента, возможно, что каждая из ее подчиненных конституент глубины $d + 1$ будет тривиально противоречивой. В этой ситуации веса перераспределяются следующим образом.

Предположим, что каждая конституента, подчиненная C^d , на глубине $d + 1$ тривиально противоречива, в то время как C^d не является таковой. Теперь предположим, что C^e (где $e < n$) есть первая конституента до C^d , которая имеет нетривиально противоречивую конституенту глубины $d + 1$. Мы знаем, что должны быть такие конституенты благодаря факту, что C^d не является тривиально противоречивой. Если X будет множеством всех этих нетривиально противоречивых конституент глубины $d + 1$, подчиненных C^e , веса вероятностей будут распределены среди элементов X . Сумма весов должна быть равна 1 для каждой глубины, и простоты ради можно предположить такое распределение (рис. 1) [Rantala, Tselishchev, 1988].

Белые кружки обозначают тривиально противоречивые конституенты, а черные кружки – непротиворечивые или нетривиально противоречивые конституенты. Стрелки специфицируют, как перераспределяются веса. Вес распределяется равным образом среди подчиненных конституент следующего уровня. Если обозначить поверхностную вероятность через p' , тогда на фигуре $p'(C^e) = r$. Ясно, что поверхностная вероятность релятивизована к глубине конституенты.

Рис. 1 демонстрирует перераспределение весов, где каждая конституента на глубине $d + 1$, подчиненная конституенте C^d , тривиально противоречива, в то время как C^d не является таковой, и где C^e есть первая конституента, которая имеет нетривиально противоречивые подчиненные конституенты глубины $d + 1$.

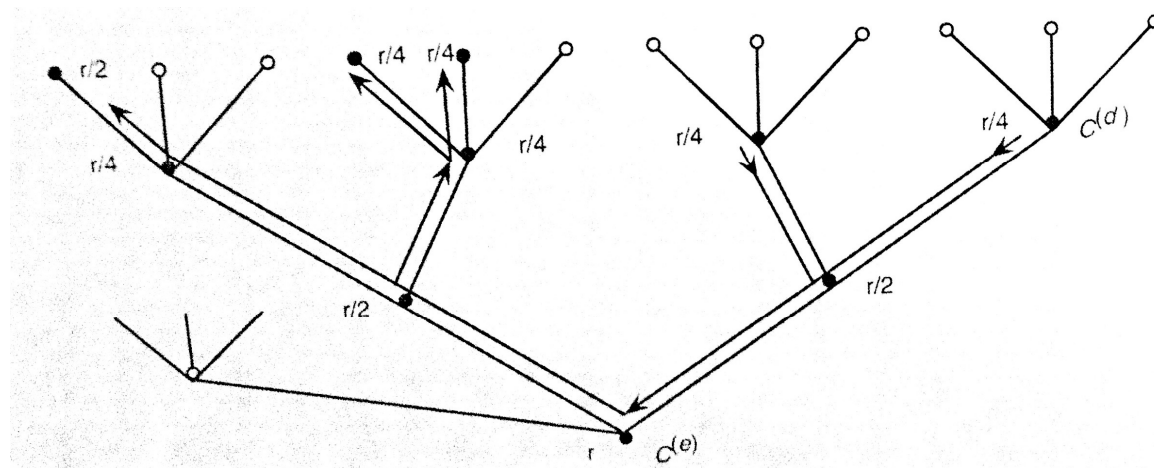


Рис. 1

Этот факт выражается формулой

$$p^d(s) = \sum p^i(C^d_i),$$

а значит,

$$\inf d(s) = 1 - p^d(s).$$

Для глубинной информации мы имеем такие соотношения:

А) $\inf(s) = 0$, если и только если $\vdash s$;

В) $\inf(s) = 1$, если и только если $\vdash \neg s$;

С) $\inf(s) > \inf(s') = 0$, если $\vdash s \supset s'$, но $\neg(s \supset s')$;

Д) $\inf(s) = \inf(s')$, если $\vdash s \equiv s'$.

Но для поверхностной информации эти соотношения не справедливы. Действительно, в отношении пункта А можно заметить, что предложение s может быть доказуемо в логике первого порядка, в то время как $\inf^d(s) > 0$ для некоторой глубины d . В частности, может быть случай, где имеются нетривиально противоречивые конститuenty глубины d , которые не входят в дистрибутивную нормальную форму предложения s глубины d . По мере расширения предложения в более глубокие дистрибутивные нормальные формы его поверхностная информация будет соответственно изменяться. Рис. 2, 3 и 4 отражают три различных случая. Первый случай, когда

$$\text{cont}^{d+1}(s) > \text{cont}^d(s),$$

второй случай, когда

$$\text{cont}^{d+1}(s) = \text{cont}^d(s),$$

и третий случай, когда

$$\text{cont}^{d+1}(s) < \text{cont}^d(s).$$

Рис. 2 демонстрирует, как расписывание предложения в более глубокие дистрибутивные нормальные формы приводит к изменению поверхностной информации, где $\inf^{d+1}(s) < \inf^d(s)$.

На рис. 3 показано, как расписывание предложения в более глубокие дистрибутивные нормальные формы приводит к изменению поверхностной информации, где $\inf^{d+1}(s) = \inf^d(s)$.

Рис. 4 демонстрирует, как расписывание предложения в более глубокие дистрибутивные нормальные формы приводит к изменению поверхностной информации, где $\inf^{d+1}(s) > \inf^d(s)$.

Интуитивное отношение между поверхностной и глубинной информацией дается уравнением

$$\lim_{\infty} \inf^d(s) = \inf(s).$$

Информация касательно дедуктивного вывода определяется в терминах поверхностной информации. Это чрезвычайно важное положение, поскольку именно оно позволяет полагать математику представлением знания, делая математический вывод информативным. В противном случае математика не была бы незаменимой, или же ее незаменимость была бы попросту мистической. Это положение делается с помощью метода опровержения. Предположим, что s противоречиво. Далее, мы знаем, что имеется такая глубина $e > d$, где s^e будет первым расширением s^d таким, что каждая конститuentа будет тривиально противоречива.

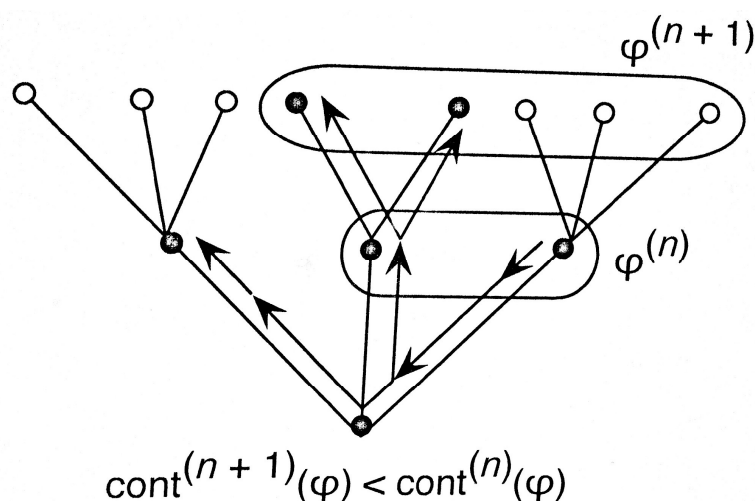


Рис. 2

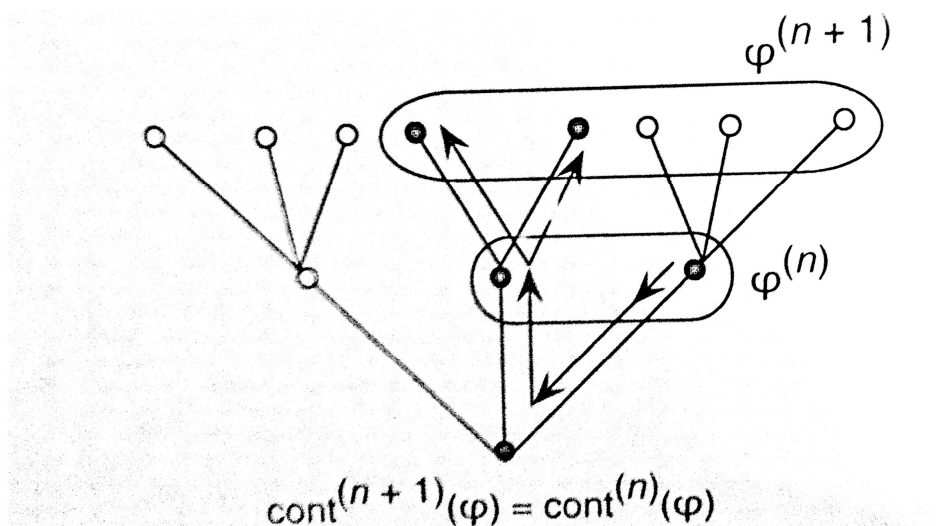


Рис. 3

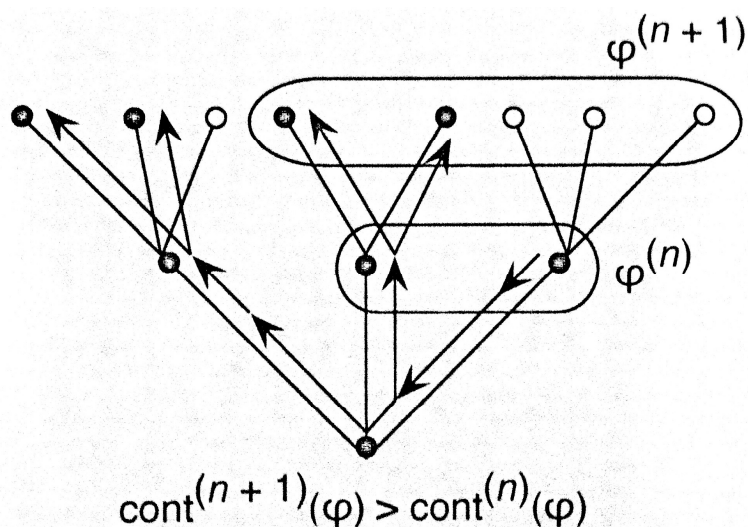


Рис. 4

Таким образом, дистрибутивная нормальная форма может быть использована для опровержения. Через процедуру опровержения предложения s будет происходить изменение поверхностной информации. Поверхностная информация предложения s на глубине e будет больше, чем поверхностная информация на глубине d , поскольку $\text{inf}^e(s) = 1$ (так как s противоречиво). Поверхностная информация получается, таким образом, следующей:

$$\text{inf}^e(s) - \text{inf}^d(s) = 1 - \text{inf}^d(s) = p^d(s).$$

Безусловно, поверхностная информация будет равна нулю, в случае $e = d$. Она будет ненулевой для всех остальных случаев. До-

казательство общезначимого предложения s производится через опровержение дистрибутивной нормальной формы предложения $\neg s$.

Поверхностная информация гораздо более естественна при анализе пропозициональных установок, в частности, в модальных контекстах, чем глубинная информация. Так, в контексте логики знания утверждение «А знает, что...» или «А верит, что...» субъект имеет в виду то, что процедура получения знания или веры является тем, что мы называем в общем-то более или менее эффективной процедурой. В реальных обстоятельствах мы не готовы, и даже не

стремимся получить абсолютно всю информацию и проверить все альтернативы. Мы довольствуемся некоторым уровнем знания или веры. В коммуникации вряд ли сообщаем нечто, что можно извлечь только с помощью логических манипуляций. С этим связан знаменитый парадокс всеведения, согласно которому если одно утверждение влечет другое, то вряд ли знание первого влечет знание второго. Другими словами, мы довольствуемся поверхностной семантической информацией, поэтому в этом понятии нет ничего субъективного. Скорее, мы настаиваем на рекурсивном характере знания. Именно этот вид семантической информации является основой вывода об информативности дедуктивного знания и по этой причине лежит в основе представления знания.

Список литературы

Целищев В. В. Философские проблемы семантики возможных миров. М.: URSS, 2010.

Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М., 1963.

Bar-Hillel Y., Carnap R. Semantic Information // *The British Journal for the Philosophy of Science*, Aug., 1953. Vol. 4. No. 14. P. 147–157.

Rantala V., Tselishchev V. Surface Information and Analyticity // *Jaakko Hintikka / Ed. by R. Bogdan. Dordrecht*, 1988.

Материал поступил в редколлегию 17.02.2010

V. V. Tselischev

SEMANTIC INFORMATION AND KNOWLEDGE REPRESENTATION

The article deals with the problem of formalized representation of knowledge which arises out of attempts to automate extraction of new knowledge with the help of computational procedures. Correlation of semantics and syntax in knowledge representation is considered to be one of the most important problems which can be solved by determining the informativeness of a deductive inference. The author proposes a theory of distributive normal forms as the most efficient solution of these problems. This theory allows to measure the informativeness of a deductive inference and, thus, provide the basis for solving the correlation problem of syntactic and semantic components in knowledge representation.

Keywords: knowledge representation, semantics and syntax, information, distributive normal forms.