

ВСЕРОССИЙСКИЙ ИНСТИТУТ НАУЧНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
(ВИНИТИ)

НАУЧНО • ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Серия 2. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И СИСТЕМЫ
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Издается с 1961 г.

№ 11

Москва 2000

КАУЗАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 004.81:510.64

В. К. Финн

ДСМ-метод как средство анализа каузальных зависимостей в интеллектуальных системах

Рассматриваются особенности ДСМ-метода автоматического порождения гипотез как средства выявления причинно-следственных отношений, неявно содержащихся в базах данных, используемых для машинного обучения. Отмечается также адекватность ДСМ-метода как логического средства качественного анализа социологических данных.

ДСМ-метод автоматического порождения гипотез [1,2], реализующий в интеллектуальных системах правдоподобные рассуждения, которые осуществляют взаимодействие эмпирической индукции, аналогии и абдукции [3], является формализованным средством машинного обучения для извлечения каузальных зависимостей из массивов эмпирических данных (специализированных баз данных). Условиями применимости ДСМ-метода являются:

1) достаточная структурированность данных (фактов, представляющих начальное состояние изучаемого "мира"), обеспечивающая формализацию сходства фактов (объектов и присущих им множеств свойств);

2) наличие в изучаемом "мире" как позитивных, так и негативных фактов¹, ради удобства называемых (+)- и (-)-фактами, соответственно;

3) наличие неявно заданных в изучаемом "мире" как позитивных, так и негативных зависимостей причинно-следственного типа, называемых (+)-, (-)-причинами, соответственно;

4) слабая формализованность знаний об изучаемом "мире", который будем обозначать посредством $W^{(\pm)}$, в частности, выражающаяся в том, что знания о начальном состоянии $W^{(\pm)}$ содержат утверждения с оценкой "неопределенно".

Можно выделить три класса "миров", различающихся своими онтологиями, которые определяют адекватные логико-математические средства представления знаний об этих "мирах" [4].

"Мир" типа 1 характеризуется состояниями, порожденными случайными событиями и их взаимодействиями, отображенными вероятностными методами.

"Мир" типа 2 образован объектами и условиями, вынуждающими определенное поведение этих объектов (появление или непоявление каких-либо свойств и отношений, реализация взаимодействий с другими объектами и т. п.). Условия, вынуждающие определенное поведение объектов, называют их детерминацией, а факторы, выделяемые в качестве существенных (без которых отсутствуют соответствующие эффекты), называют причинами.

¹(+)-факт представляет знания о наличии у объекта множеств свойств, а (-)-факт — об отсутствии соответствующих свойств.

Если поведение всех объектов во всех состояниях этого "мира" обусловлено детерминацией, то такой "мир" называют **детерминистским**. Классическими примерами такого "мира" являются механика И. Ньютона и философская онтология Б. Спинозы (условно будем называть "миры" этого типа "мирами" Ньютона — Спинозы).

"Мир" типа 3 образован объектами, такими, что они подвергаются как детерминации, так и случайным возмущениям, а потому на заключительные состояния этого "мира" влияют случайные события.

Следует отметить, что как уточнение идеи причинности, так и характеристика принципов детерминизма и индетерминизма являются глубокими и трудными проблемами методологии и философии науки. В связи с этим достаточно упомянуть знаменитую дискуссию о природе микромира между Альбертом Эйнштейном и Нильсом Бором (Эйнштейн говорил, что Господь Бог достаточно разумен, чтобы сделать мир детерминистским, Бор же утверждал, что квантовая механика адекватна индетерминистскому устройству физического микромира).

В [5] К. Р. Поппер попытался дать онтологическое обоснование индетерминизма как онтологического принципа научного знания, выдвинув теорию предрасположенности для объяснения причинности и обоснования индетерминизма. Согласно К. Р. Попперу, предрасположенность — внутреннее свойство, присущее не объекту, а **ситуации**, частью которой он является. Ситуация меняет возможности и тем самым меняет предрасположенность объекта к определенному состоянию: изменяются ситуации — изменяются возможности, а тем самым предрасположенности к определенным эффектам, — все это влияет на "мир" (и на теории о нем), а потому детерминизм (согласно Попперу) ошибочен, ибо реальны свобода воли и индетерминизм. В связи с этим заметим, что эта доктрина К. Р. Поппера согласуется как с его идеей ситуационной логики, являющейся логикой социальных наук [6], так и с его отрицанием принципов историзма, признающего существование общих законов истории и социальной жизни и допускающего возможность предсказания событий будущего [7].

Противоположная точка зрения на роль каузальных объяснений в истории и социальных науках была развита Карлом Гемпелем [8] в его работах "Функция общих законов в истории", "Логика объяснения" (в соавторстве с П. Опенгеймом) и "Дилемма теоретика: исследования логики построения теории". **Объяснение** по Гемпелю-Опенгейму явления **Е** ("объясняемого") есть логический вывод из посылок двух видов — ("объясняющего") C_1, C_2, \dots, C_k (начальные эмпирические условия) и L_1, L_2, \dots, L_r (общие законы). Аналогичную структуру имеет и **предсказание**.

В соответствии с этой схемой понимается и идея причинности — для ее выражения необходимо иметь общие законы. Эти общие законы L_1, \dots, L_r являются представлением знаний о причине как о необходимой связи (если **Е** — характеристика причинно-следственной зависимости). Историческое объяснение, как и объяснение в различных науках о социальном поведении, основано на использовании общих законов и дедукции (индукция может быть использована лишь как средство поиска общих законов).

Отметим, что фактически единственным существенным совпадением в теории знания К. Р. Поппера и К. Г. Гемпеля является использование дедуктивной теории как универсального средства представления знаний.

В работах [3, 10, 11] были предложены уточнения каузальной зависимости посредством специальной формализации высказываний вида "если p , то q ". В [10] используются контрфактические (сопоставительные) высказывания, а в [11] предлагается интересная идея определения "каузальной импликации" посредством учета "отрицательных" факторов (p каузально влечет q , если отсутствуют отрицательные факторы, препятствующие появлению q).

В [12] Г. фон Вригт развил концепцию каузальности и каузального объяснения посредством рассмотрения причинно-следственных зависимостей как достаточных, необходимых и необходимых и достаточных условий, используя идеи модальной и временной логики и соответствующих описаний состояний, последовательный переход которых от начального к конечному образует некоторую "историю".

Отличительной особенностью упомянутых работ [9–12] является попытка уточнения причинно-следственной зависимости средствами пропозициональной логики (для выражения условного высказывания "если p , то q ") в рамках дедуктивных систем.

Отличительной особенностью упомянутых работ [9–12] является попытка уточнения причинно-следственной зависимости средствами пропозициональной логики (для выражения условного высказывания "если p , то q ") в рамках дедуктивных систем.

ДСМ-метод автоматического порождения гипотез в соответствии со своими условиями применимости реализуем в "мирах" типа 2. Таковыми являются проблемы наук о жизни и социальном поведении. Один из наиболее развитых вариантов ДСМ-метода — симметричный ДСМ-метод — предполагает существование в исследуемой предметной области (+)- и (-)-каузальных зависимостей, гипотезы о которых порождаются Рассуждателем интеллектуальной системы.

Рассуждатель ДСМ-системы реализует правдоподобные рассуждения [1, 2, 3], осуществляющие взаимодействие эмпирической индукции, аналогии и абдукции. Синтез этих познавательных процедур в "мире" типа 2 с симметричными (\pm)-каузальными зависимостями является **операциональным** определением отношения "причина — следствие" относительно данных и знаний, представленных в квазиаксиоматической теории², соответствующей некоторой предметной области и некоторому набору ее проблем [1, 3].

Таким образом, отношение "причина — следствие" (а не условное высказывание "если p , то q "), определяемое посредством (\pm)-гипотез о каузальной зависимости, порождается из исходных данных о $W^{(\pm)}$, а затем используется посредством абдукции [3], являющейся критерием достаточного основания принятия гипотез и, следовательно, средством формирования отношения ДСМ-каузальности. Это отношение и является уточнением идеи причинности средствами ДСМ-метода автоматического порождения гипотез.

В связи с этим отметим некоторые особенности формализации каузальных зависимостей в рамках ДСМ-метода.

(1). Отношение "причина — следствие" в ДСМ-методе двусортно, так как терм, представляющий в гипотезе о каузальной зависимости причину, есть подобъект некоторых объектов, а терм, представляющий следствие, есть множество свойств, характеризующее эффект, вынуждаемый причиной

²Квазиаксиоматическая теория есть средство представления знаний для открытых предметных областей [3].

определенного знака (однако при отсутствии причин противоположного знака — (+) и (−))³.

В ДСМ-рассуждении, в соответствии со специфическими правилами правдоподобного вывода 1-ого рода, порождающими гипотезы о (±)-причинах, имеются три типа каузальных отношений, представимых предикатами $V \Rightarrow_2 W$ (V — причина наличия/отсутствия множеств свойств W), $T(V, X, W)$ (V — причина наличия/отсутствия множеств свойств W без реализации “тормозов” из множества X) [1], $R((V, S), W)$ (V — часть причины множества свойств W при условии ситуации S) [13]. Таким образом, V есть “предрасположенность” для вынуждения эффекта W (соответствующего ей множеству свойств). V как подобъект объекта X является реальной (+)-причиной W , если X не содержит Z , могущих быть (−)-причинами для непустого подмножества Y множества W (аналогичное имеет место для (−)-причин и препятствующих им подобъектов Z , могущих быть (+)-причинами для непустого подмножества Y множества W).

Очевидно также, что для того чтобы выполнялись предикаты $T(V, X, W)$ и $R((V, S), W)$, необходимо, чтобы имели место соответствующие условия для X и S — контекстов V , реализующих или не реализующих “предрасположенность V ”.

Различие смысла переменных V (подобъекта) и W (множества свойств) влечет за собой несимметричность бинарных ДСМ-причин (для $V \Rightarrow_2 W$ и $R((V, S), W)$). В силу этого для характеристики отношения ДСМ-каузальности как несимметричного предшествование во времени V относительно W не является существенным⁴.

(2). Конструктивным средством выявления (±)-причины является сходство между (±)-фактами одного знака, где под фактом понимается высказывание типа “высказывание «объект C обладает множеством свойств A » имеет истинностную оценку $\langle \nu, n \rangle$, где $\nu \in \{1, -1, 0, \tau\}$, а $1, -1, 0, \tau$ — соответственно, типы истинностных значений “фактическая истина”, “фактическая ложь”, “фактическое противоречие” и “неопределенность”, n — номер шага вычислений, выражающий степень правдоподобия истинностного значения, а ν — тип истинностного значения. В языке ДСМ-метода это высказывание имеет вид $J_{(\nu, n)}(C \Rightarrow_1 A)$, где $J_{(\nu, n)}$ — оператор Россера — Тюркетта, а $X \Rightarrow_1 Y$ — исходный предикат: объект X обладает множеством свойств Y . Массив начальных данных D (база данных и база фактов) содержит высказывания вида $J_{(\nu, n)}(C \Rightarrow_1 A)$. В результате же применения ДСМ-рассуждений порождаются высказывания вида $J_{(\nu, n)}(C \Rightarrow_2 A)$, где $n > 0$, означающие, что “высказывание «подобъект C причина множества свойства A » имеет истинностное значение ν ”. Отметим, что при $n = 0$ $J_{(\nu, n)}(C \Rightarrow_1 A)$ являются фактами, а при $n > 1$ высказывания $J_{(\nu, n)}(C \Rightarrow_j A)$, где $j = 1, 2$, являются гипотезами. Соответствующие замечания имеют место и для высказываний, содержащих предикаты $T(V, X, W)$ и $R((V, S), W)$.

Таким образом, понимание идеи причинности в рамках машинного обучения посредством ДСМ-метода опирается на принцип структурализма — представления гипотетических причин (как предрасположенностей в смысле [5]) в виде сходств фактов, имеющих определенную структуру (мно-

жеств, кортежей, плоских графов, систем отношений). Причем гипотезы о (±)-причинах конструктивно порождаются из фактов, выражимых посредством предикатов $X \Rightarrow_1 Y(P(X, Y, S)$ — «объект X обладает (не обладает) множеством свойств Y в ситуации S » [13]). Эти гипотезы о (±)-причинах выражимы посредством предиката $V \Rightarrow_2 W$ (соответственно, $R((V, S), W)$, $T(V, X, W)$), отличного от $X \Rightarrow_1 Y$.

(3). Выше было отмечено важное обстоятельство, касающееся оценивания гипотез о причинно-следственных отношениях («подобъект — причина наличия/отсутствия множества свойств»): эти гипотезы имеют вид $J_{(\nu, n)}(C \Rightarrow_2 A)$ (или $J_{(\nu, n)}R((V, S), W)$, или $J_{(\nu, n)}T(V, X, W)$, где $n > 0$). Таким образом, истинностные значения гипотез о причинах не могут быть $\langle \nu, 0 \rangle$, т. е. соответствовать фактам, ибо степень оценок $n > 0$: чем больше n , тем меньше степень правдоподобия, ибо гипотезы получены конструктивным образом посредством правил лишь правдоподобного вывода [1, 2], но относительно исходного (ограниченного) массива данных, играющего роль описания изучаемого «мира». Этот способ оценивания гипотез соответствует юмовскому скептическому взгляду на результаты индукции. Конструктивный способ порождения гипотез о причинах естественным образом связан с применением бесконечнозначной логики степеней правдоподобия гипотез [2].

(4). Поскольку отношение «причина — следствие» в ДСМ-методе формируется посредством применения правдоподобных рассуждений в квазиаксиоматических (открытых) теориях [1, 3], то определение этого отношения зависит от выразительных средств логического языка, в котором формализуются эти рассуждения. Как было показано Д. В. Виноградовым [16], ДСМ-рассуждение (правила вывода по индукции, правила вывода по аналогии и абдуктивное объяснение) для конечных моделей выразимы средствами логики предикатов 1-ого порядка⁵, для бесконечных же моделей оно выразимо средствами слабой логики предикатов 2-ого порядка.

Таким образом, логический язык, а, следовательно, и определение отношения «причина — следствие» зависит от характера предметной области (мощности соответствующих моделей).

Из сказанного выше вытекает бедность идеи о пропозициональной характеристике причинно-следственных зависимостей.

Отметим, что попытка определения отношения причинности предпринята в [17], где используются средства модальной и временной логики.

(5). Следующей особенностью использования идеи причинности в ДСМ-методе является применение принципа аргументации (в смысле [4]) при оценивании высказываний, что согласуется с использованием онтологии «мира» $W(\pm)$, содержащего (+)-факты и (−)-факты и соответствующие им причины. Аргументами при принятии тех или иных гипотез о $W(\pm)$ (этот принцип называется аксиомой каузальной полноты [1]) являются (±)-гипотезы (это обстоятельство рассмотрено в [3]). В частности, оценивание и анализ причин возможны для случаев конфликтности — «столкновения» (+)- и (−)-причин в объектах и ситуациях.

³ Это свойство ДСМ-причин согласуется с идеей А. Беркса в [11] об отсутствии “отрицательных” условий.

⁴ В соответствии с идеей причинности Д. Юма [14] в [15] П. Сушес в определении отношения “причина — следствие” вводит условие предшествования во времени причины относительно следствия.

⁵ Ранее было известно, что правила правдоподобного вывода 1-ого рода (индукция), правила правдоподобного вывода 2-ого рода (аналогия) выразимы в языке слабой логики 2-ого порядка [2].

(6). Важным обстоятельством, характерным для рассматриваемого в ДСМ-методе «мира» $W(\pm)$, является выполнение онтологического принципа: у каждого σ -факта имеется σ -причина, где σ есть (+)- или (-)-означивание. Этот принцип используется как основание для абдуктивного принятия гипотез о причинах эффектов в объектах мира $W(\pm)$ [3]. А потому концепция (\pm)-причинности в ДСМ-методе является **индуктивно-абдуктивной**, ибо использует индуктивное порождение гипотез и абдуктивное их принятие.

Аргументированное принятие гипотез посредством абдукции в ДСМ-методе является **недедуктивным** объяснением (т. е. объяснением не в смысле [8]). Этот вид объяснения данных в $W(\pm)$ можно называть индуктивно-абдуктивным обоснованием или аргументированием. Подобное понимание причинности в ДСМ-методе согласуется с идеей Г. Гельмгольца о том, что причина — это то, что применительно к некоторой принятой теории описывается начальными условиями, а эффект (или действие) — это событие или положение дел, которое предсказывает теория при заданных начальных условиях.

Следует подчеркнуть также упомянутое ранее ограничение на истолкование причинно-следственных отношений в ДСМ-методе: (\pm)-причины понимаются как результаты «машинного открытия» [18] посредством ДСМ-рассуждений, применяемых к «мирам», адекватным ДСМ-методу автоматического порождения гипотез. Таким образом, гипотезы о (\pm)-причинах являются формализацией причинно-следственных зависимостей в рамках рассматриваемого варианта машинного обучения, т. е. средством упорядочения данных и знаний: «мы нуждаемся в законе причинной связи явлений друг с другом, чтобы иметь возможность искать и показывать естественные условия естественных событий» [19].

В начале данной статьи мы охарактеризовали типы знаний о трех «мирах», подробнее остановившись на описании «мира» -2 («мира» Ньютона-Спинозы), к данным и знаниям которого применим ДСМ-метод. Заметим теперь, что возможные модификации ДСМ-метода, адекватные третьему «миру» и объединяющие возможности анализа «мира»-1 и «мира»-2, т. е. допускающие применение статистических соображений, которые дополняют детерминации в этом «мире». Общая концептуальная каузальная модель «мира»-3, к которому применим ДСМ-метод автоматического порождения гипотез, развита О. М. Аншаковым в [20], при этом практическая реализация соответствующей модификации ДСМ-метода описана ранее П. А. Григорьевым в [21].

Важно отметить тот факт, что для выражения причинно-следственных зависимостей в «мире»-3 в [20] используются обобщенные кванторы [22].

Согласно Т. Парсонсу [23], общая социологическая теория должна иметь средство описания фактов, средства их анализа и обобщения, а также средства установления логической взаимосвязи между знаниями. В этом случае, как считает Парсонс, возможно успешное применение теории к эмпирическим данным.

Результаты применения ДСМ-метода к анализу данных о солидарном поведении [24] свидетельствуют об адекватности ДСМ-метода как средства анализа детерминаций социального поведения факторами, образованными комбинациями сведений о социальном характере, личностных качествах и биографических данных субъектов социального по-

ведения. В этой работе установлен эффект влияния ситуации на социальное поведение, что явилось одним из стимулов создания ситуационного расширения ДСМ-метода автоматического порождения гипотез [13].

Формальный аппарат ДСМ-метода позволяет уточнить некоторые неточные идеи, трансформируя их в понятия с обозримым и конструктивно оцениваемым содержанием в смысле [25]. Примерами таких уточнений являются отношение «причина — следствие», контекстно-зависимая индукция, абдукция, открытая теория (квазиаксиоматическая теория), детерминация поведения социального субъекта, формализованный метод качественного анализа социологических данных [25], которые формализуются и экспериментально используются в ДСМ-методе автоматического порождения гипотез и основанных на нем интеллектуальных системах.

Сравнение результатов применения ДСМ-метода как метода **качественного** анализа социологических данных представляет определенный исследовательский интерес. Среди методов обработки качественных эмпирических социологических и социально-экономических данных отдельное направление представляет детерминационный анализ С. В. Чеснокова. Метод предоставляет инструментарий для решения задач, связанных с поиском зависимостей между отдельными переменными (или группами переменных). В этом смысле использование термина *детерминационный* может быть отнесено на счет достаточно произвольного толкования понятия *детерминации*. «Детерминацией» в методе Чеснокова называется правило «если a , то b », причем используемое для этого правила символическое обозначение $a \rightarrow b$ совпадает с обозначением логической импликации. Мерой точности предсказания b на основе a по этому правилу служит величина эмпирической условной частоты $P(b|a)$. Сам автор в основополагающей работе [26] признает: «Как метод, детерминационный анализ представляет собой прямое развитие ... тривиальной техники — подсчета условных частот (которые содержатся в таблицах сопряженности признаков), связывающих значения переменных между собой, и, далее, к сравнению этих условных частот между собой». Несомненным достоинством этого метода является обеспечение анализа и процедуры содержательной интерпретации для многомерных таблиц сопряженности.

Следует признать, однако, что самое совершенное исчисление эмпирических условных частот позволяет говорить о выявлении, как правило, лишь корреляционных связей — отнюдь не каузальных зависимостей. Понимание «детерминации» именно как каузальной зависимости больше отвечает задаче объяснения эмпирической действительности как поиска ответа на вопрос «почему?». На формальном уровне, как было показано в [1, 3], следует рассматривать детерминацию не как импликацию $a \rightarrow b$, а как отношение $a \Rightarrow b$.

В настоящем сборнике представлены работы, развивающие анализ причинно-следственных зависимостей посредством ДСМ-метода автоматического порождения гипотез в русле идей машинного обучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Финн В. К. Правдоподобные выводы и правдоподобные рассуждения // Итоги науки и техн. Сер. Теория вероятностей. Мат. статистика. Теор. кибернетика / ВИНТИ. — 1988. — Т. 28. — С. 3-84.
2. Аншаков О. М., Скворцов Д. П.,