



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
технологический институт
(технический университет)»
(СПбГТИ(ТУ))

Московский пр., д.26, г.Санкт-Петербург, 190013,
телеграф: Санкт-Петербург, Л-13, Технолог,
факс: ректор (812) 710-6285, общий отдел (812) 712-7791,
телефон: (812) 710-1356,
E-mail: office@technolog.edu.ru

16.03.2018 № 655

«УТВЕРЖДАЮ»
Ректор федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский
государственный технологический
институт (технический университет)»,
доктор технических наук, доц.
А.П. Шевчик



ОТЗЫВ

ведущей организации — федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» на диссертацию Андрея Алексеевича Золотина «Матрично-векторные уравнения локального апостериорного вывода в алгебраических байесовских сетях», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.17 — Теоретические основы информатики

Актуальность диссертационного исследования

Представленная диссертационная работа посвящена развитию (в рамках логико-вероятностного подхода) теории вероятностных графических моделей сложных систем знаний с неопределенностью, а более точно — теории алгебраических байесовских сетей.

Ключевым направлением диссертационного исследования соискателя является развитие теории алгебраических байесовских сетей, подразумевающей декомпозицию знаний на фрагменты, связанные между собой различными видами структур, причем основным объектом исследования является локальный логико-вероятностный вывод на трех структурах: идеале конъюнктов, идеале дизъюнктов и наборе пропозиций-квантов.

Отметим, обращаясь к вопросам декомпозиции сложных систем знаний и архитектуры их вероятностных графических моделей, что данная теория в рамках современных исследований в области искусственного интеллекта берет исток в публикациях Дж. Перла, подытоженных трудом «Вероятностные рассуждения в интеллектуальных системах». Рассуждения о представлении связи между элементами базы знаний послужили впоследствии одной из основ теории байесовских сетей доверия, продолжающей развиваться и сегодня. Байесовские сети доверия привлекают сторонников по всему миру, а список областей, где они находят себе применение, продолжает расти.

Например, профессор Н. Фентон, описывая в своей книге «Оценка рисков и анализ решений байесовскими сетями» (Risk assessment and decision analysis with Bayesian networks) применение байесовских сетей доверия в оценке рисков в таких областях как медицина, финансы, право и надежность систем, говорит о гибкости подхода, предлагаемого

байесовскими сетями в решении актуальных проблем даже из областей, напрямую не связанных с математикой и информатикой. Другой автор — профессор Р. Неаполитан — рассуждает в научном труде “Вероятностные методы для биоинформатики: введение в байесовские сети” (Probabilistic methods for bioinformatics: with an introduction to Bayesian networks) о применении вероятностного подхода в целом и байесовских сетей в частности в анализе генома. Приводя частные примеры применения байесовского подхода, автор показывает его эффективность в биологическом анализе данных.

Тем не менее, современное состояние данной области таково, что в ней не предложены систематические подходы к представлению и обработке интервальных оценок вероятностей, или, иными словами, “неточных вероятностей” (imprecise probabilities). В свою очередь, потребность обработки интервальных оценок степеней доверия (в том числе, оценок вероятностей) неоднократно обсуждалась в публикациях по тематике моделирования знаний с неопределенностью (в частности, в публикациях В. Крейновича). В этом свете, существенной характерной особенностью алгебраических байесовских сетей является наличие аппарата для обработки интервальных оценок вероятностей.

Следует упомянуть, что самая ранняя публикация по алгебраическим байесовским сетям датируется, по-видимому, 1982 годом, а собственно термин “алгебраические байесовские сети” впервые появился в публикации в 1993 г.; затем следует ряд монографий, изданных в 1995, 2000, 2007 и 2009 г. и журнальные публикации. Как упоминалось, задачи диссертационного исследования направлены на развитие системы локальных структур, лежащей в основе фрагментов знаний алгебраических байесовских сетей и алгоритмов, определенных над ними. В частности, в работе рассматриваются уравнения локального апостериорного вывода. Данные уравнения до определенного предела были развиты в работах А.В. Сироткина, однако имеющееся представление было во многом основано на алгоритмическом описании процессов и больше подходило для программной реализации, чем для анализа в рамках математической теории. Однако, недостатки существующего аппарата апостериорного вывода как средства для описаний алгоритмов, так и для дальнейших исследований стали еще более очевидны с развитием аспектов глобального логико-вероятностного вывода в алгебраических байесовских сетях.

Таким образом, актуальность диссертационного исследования подтверждается как необходимостью развития данной модели представления знаний в целом, так и нехваткой, неполнотой описания этой модели, ее аспектов и свойств, а где-то — и избыточностью проводимых вычислений, присутствующих в аппарате локального апостериорного логико-вероятностного вывода в частности.

Научная новизна полученных результатов

Диссертация имеет четкую структуру, в которой вклад соискателя строго локализован: первая глава предлагает обзор предметной области, во второй вводится необходимый математический аппарат, а все новые теоретические и практические результаты, принадлежащие соискателю, изложены в третьей и четвертой главах соответственно. В диссертации рассматривается локальная структура алгебраической байесовской сети — фрагмент знаний — и предлагаются новые уравнения, связывающие систему оценок вероятностей на элементах носителя одной из альтернативных моделей (идеала дизъюнктов) с системами оценок вероятностей на элементах носителей двух других, в определенном смысле «традиционных» представлений фрагментов знаний — идеалом конъюнктов и набором пропозиций-квантов.

Ранее в работах А.В. Сироткина были сделаны первые шаги к развитию матричной формулировки уравнений для решения двух задач апостериорного вывода. Одним из основных результатов диссертационного исследования соискателя являются новые уравнения апостериорного вывода, основанные на использовании введенных векторов взамен применявшихся матриц. Новизна данного результата заключается как в самих уравнениях первой и второй задач, так и в построении упомянутых векторов. Для каждого из них предложено и доказано разложение в кронекерово произведение n векторов размерности 2, а также представлен способ покомпонентного вычисления элементов векторов с помощью битовых операций с элементами свидетельства. Переход от произведения матриц к произведению векторов позволяет сократить объем вычисляемых и хранимых данных с

$2^n \times 2^n$ действительных чисел для матриц до 2^n действительных чисел, где n — мощность алфавита фрагмента знаний.

Однако в диссертации рассматриваются не только локальные структуры, но и глобальные, связывающие фрагменты знаний в единую сеть, а именно вторичная и третичная структуры. Логичным следствием из полученных матричных уравнений локального апостериорного вывода является новый способ передачи информации, называемой свидетельством, из одного фрагмента знаний в другой. Предложенный способ также основывается на использовании проекционной матрицы из одного носителя фрагмента знаний в другой, формируемой с помощью операций тензорного произведения из матриц размерности 2.

Матричный подход отражен и в программной реализации, описанной в заключительной, четвертой главе диссертации. Комплекс программ воплощает предложенные алгоритмы и, благодаря графическому интерфейсу, позволяет проводить вычислительные эксперименты в рамках исследований.

Достоверность и обоснованность результатов

Основные положения диссертационной работы обоснованы как теоретически в ходе доказательств соответствующих теорем и утверждений, так и практически — как результат реализации и корректной работы комплекса программ, имплементирующего указанные теоретические результаты.

Достоверность теоретических и практических результатов подтверждается строгим использованием математического аппарата, а также широкой апробацией результатов исследования на ряде всероссийских и международных конференций, по результатам одной из которых соискателем получен диплом “Best paper award” за лучшую представленную работу, копия которого помещена в одно из приложений диссертации.

Наконец, результаты исследования опубликованы в 37 научных изданиях, среди которых присутствуют журналы, входящие в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук (9) и издания, индексируемые в базах WoS и(или) SCOPUS (9).

Теоретическая и практическая значимость результатов

Значимость теоретических результатов диссертационной работы для развития теории алгебраических байесовских сетей во многом объясняется назревшей необходимостью развития аппарата локального апостериорного вывода. Матричные уравнения, описывающие решение первой и второй задач апостериорного вывода, позволяют не только сократить объем вычислений, но и также существенно упрощают анализ указанных моделей (например, анализ чувствительности и анализ вычислительной сложности, проведенные в диссертации). Немаловажным является и тот факт, что рассмотрены не только бинарные и скалярные оценки вероятностей, но и отдельный раздел посвящен неточным оценкам вероятностей — области, где алгебраические байесовские сети показывают себя наиболее выгодно в сравнении с иными вероятностными графическими моделями сложных систем знаний с неопределенностью, не предлагающими средств для обработки совокупности взаимосвязанных интервальных оценок вероятности истинности. Поставленные задачи линейного программирования позволяют рассматривать фрагменты знаний и свидетельства с интервальными оценками вероятностей.

В то же время реализация моделей фрагментов знаний и алгоритмов пропагации (распространения) свидетельства в рамках комплекса программ представляет также и практическую значимость, давая возможность протестировать описанную модель. Кроме того, комплекс программ может быть использован как для проведения вычислительных экспериментов, что немаловажно для тестирования модели в рамках новых исследований, так и в учебном процессе, наглядно демонстрируя изучаемую теорию на конкретных примерах, а также открывая возможность для компаративного анализа, в который будет вовлечена как теория алгебраических байесовских сетей, так и теория байесовских сетей доверия вместе с теориями других вероятностных графических и родственных моделей.

Кроме того, развитие глобального апостериорного вывода вкупе с алгоритмами синтеза вторичной структуры позволяет сделать очередной шаг в распространении результатов локального вывода на операции, связанные с глобальными структурами. Данные результаты являются важными как в рамках синтеза оценок вероятностей истинности, так и в рамках машинного обучения структуры алгебраических байесовских сетей, а на ее основе — и байесовских сетей доверия.

Наконец, стоит также отметить, что алгебраические байесовские сети могут найти применение в теории надежности и оценке степени защищенности от социо-инженерных атак, например, когда в исходных данных скалярные оценки вероятностей недоступны и (или) когда предположение независимости определенных событий (утверждений) нуждается в релаксации.

В целом, результаты диссертации значимы для области искусственного интеллекта как отрасли физико-математической наук, развивая существующие и предлагая новые модели и алгоритмы анализа данных в условиях дефицита информации, а также представления и обработки знаний с неопределенностью.

Замечания по тексту диссертации

В ходе работы по анализу текста диссертации, было сформулировано несколько замечаний и вопросов:

1. В формуле 2.8 при описании формирования матрицы $\mathbf{T}^{(i,j)}$ впервые вводится символ \otimes , однако его определение дается позже, уже в третьей главе;
2. На рисунке 3.1, схематично иллюстрирующем алгоритм пропации стохастического свидетельства в фрагмент знаний с скалярными оценками вероятностей, носитель фрагмента-свидетельства и фрагмента, куда свидетельство поступает, представлены одинаковыми буквами. Для лучшего понимания рисунка стоило добавить нижние индексы;
3. При описании способа распространения виртуального свидетельства соискателю можно было упомянуть как полученные результаты применимы в алгебраических байесовских сетях над фрагментами знаний с иными носителями, им же самим упоминаемыми (идеал дизъюнктов, набор пропозиций-квантов);
4. В теореме 3.3.2 при описании векторов, из которых состоит вектор-селектор $\mathbf{s}^{(i,j)}$ допущена пометка — вместо символа \circ использован 0;
5. При описании комплекса программ, реализующего алгоритмы апостериорного вывода, в третьей главе, вместе с описанием публичного контракта, предлагаемого библиотекой, стоило привести больше примеров использования данного контракта с целью ознакомления;
6. В доказательстве теоремы 3.3.1 соискатель производит преобразования уравнения для решения первой задачи, изложенные в начале 67 страницы, в результате которых получает произведение Кронекера n матриц на вектор $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$. Здесь автор допускает незначительную ошибку, не убрав указание степени $[n]$ у вектора, занесенного внутрь произведения;
7. В уравнении 3.19 автор переходит от нормирующего множителя для идеала конъюнктов к нормирующему множителю для идеала дизъюнктов, но опускает пояснение данного перехода;
8. В тексте диссертации, рассуждая об уравнениях логико-вероятностного вывода, соискатель использует термин “матрично-векторный”, в то время как вектор является вырожденным случаем матрицы, что делает данное словосочетание в некоторой мере тавтологическим;
9. Допущено несколько незначительных грамматических и лексических ошибок: пропущены запятые около “в противном случае” в разделе 2.6.2; в первом параграфе раздела 3.2 вместо “по принципу” написано “оп принципу”; в первом параграфе раздела 3.4.1 пропущены запятые около вводных слов; в параграфе перед уравнением 3.56 не хватает запятой после деепричастного оборота “Суммируя все

вышесказанное...”; в первом параграфе раздела 4.2.3 лишняя запятая после “Говоря...”;

Тем не менее, вышеуказанные замечания носят частный характер и не влияют на высокую значимость результатов диссертационного исследования.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую высоким критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Полученные результаты являются новыми, прошедшими апробацию, а также значимыми как с теоретической, так и с практической точки зрения. Личный вклад А.А. Золотина описан в явном виде как в автореферате, так и в диссертации, и не вызывает сомнений, а количество публикаций подтверждает характеристику квалифицированного и работоспособного исследователя.

Заключение

Содержание диссертационного исследования «Матрично-векторные уравнения локального апостериорного вывода в алгебраических байесовских сетях» соответствует паспорту специальности 05.13.17 — Теоретические основы информатики в разделах 1, 2, 4, 5 и 8. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации, все результаты диссертационного исследования опубликованы, причем все основные результаты, выносимые на защиту, опубликованы в журналах из перечня российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора/кандидата наук, и (или) в изданиях, индексируемых в реферативных базах данных WoS/SCOPUS.

Полученные в ходе диссертационного исследования соискателем результаты в рамках теории алгебраических байесовских сетей и родственных моделей имеют высокую научную ценность, а также теоретическую и практическую значимость, кроме того, вносят существенный вклад в развитие моделей знаний с неопределенностью и логико-вероятностного вывода в условиях неопределенности как соответствующих отраслей теоретических основ информатики, искусственного интеллекта и мягких вычислений. Каждый из результатов прошел апробацию на конференциях, что еще раз подтверждает их достоверность.

Диссертация А.А. Золотина является завершенной научно-квалификационной работой и удовлетворяет всем требованиям действующей редакции “Положения о присуждении ученых степеней”, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе — всем критериям, перечисленным в Разделе II указанного положения, включая изложенные в п.9 (второй абзац), а сам соискатель Андрей Алексеевич Золотин заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.17 — Теоретические основы информатики.

Доклад Андрея Алексеевича Золотина заслушан на расширенном заседании кафедры системного анализа и информационных технологий СПбГТИ. Диссертационная работа и отзыв обсуждены и одобрены, протокол семинара №8 от "21" марта 2018 года.

Декан факультета информационных технологий и управления, д.т.н., профессор

А.А. Мусаев