

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
ТИМОНИНА МИХАИЛА ВЛАДИМИРОВИЧА

«Методы поиска экстремальных значений интеграла Шоке и их применение в задачах принятия решений»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационно-вычислительное обеспечение)

Актуальность избранной темы. Диссертационная работа М.В. Тимонина посвящена решению многокритериальной задачи принятия решений. Одна из основных проблем, возникающих при решении этой задачи, состоит в корректном учете предпочтений ЛПР. Критерии, в соответствии с которыми принимаются решения, могут иметь сложную иерархическую структуру, отражающую наличие связей между критериями, наличие множества разнородных информационных источников и т.д. В обсуждаемой диссертационной работе предлагается учет этих связей моделировать с помощью конструкции, которая называется интегралом Шоке. Интеграл Шоке представляет собой обобщение понятия интеграла Лебега на случай, когда мера, с помощью которой он строится, не является аддитивной, а предполагается только наличие монотонности – так называемые монотонные меры (неаддитивные меры, нечеткие меры, емкости). Интеграл Шоке не только широко используется в теории неточных вероятностей (imprecise probabilities), но и нашел широкое применение в прикладных задачах, прежде всего, как агрегирующий оператор. Известно, что любая агрегирующая функция, удовлетворяющая условиям комонотонной аддитивности, монотонности и нормировки, может быть представлена единственным образом интегралом Шоке. Поэтому интеграл Шоке можно использовать и для агрегирования критериев в теории принятия решений, и в задачах построения классификаторов в теории распознавания образов и т.д. Но широкое использование такой конструкции сдерживается двумя объективными факторами. Первый связан с большой размерностью рассматриваемого объекта: чтобы определить неаддитивную меру, необходимо задать значения на $2^n - 2$ ее несобственных подмножествах. Второй фактор связан с тем, что сам интеграл Шоке, вообще говоря, является недифференцируемой функцией, не всегда обладающей свойствами выпуклости, что затрудняет решение соответствующих задач оптимизации. В обсуждаемой диссертационной работе автором предпринята попытка преодоления, по крайней мере, второй из указанных трудностей для определенного типа задач.

Высказанные выше соображения подчеркивают актуальность избранной темы диссертации М.В. Тимонина.

Научная новизна основных выводов и результатов. Структура и содержание диссертации следующие. Первая глава диссертации носит обзорный характер. В ней дан общий обзор задач системного анализа применительно к построению информационной системы безопасности некоторой организации. Более конкретно рассмотрена задача оптимизации проектирования системы информационной безопасности. Показано, что эта задача является многокритериальной, с неполной информацией, с взаимодействующими критериями, наличием множества разнородных информационных источников и т.д. Дан обзор различных методов оптимизации и основных задач принятия решений. Показано, что аддитивной модели недостаточно для представления предпочтений в задаче многокритериального принятия решений. Тем самым аргументировано использование более сложных, чем аддитивная модель агрегирующих функций и, в частности, интеграла Шоке. Показано, что выбор наиболее предпочтительных решений сводится к решению задачи на максимизацию интеграла Шоке в некоторой области. Поставлены основные оптимизационные задачи, решаемые в диссертации. Завершается первая глава обзором некоторых приложений и работ так или иначе связанных с задачей оптимизации интеграла Шоке.

Основная теоретическая вторая глава диссертации посвящена собственно решению задачи оптимизации интеграла Шоке. Вообще говоря, интеграл Шоке является непрерывной недиффе-

ренцируемой функцией. В случае «хороших» монотонных мер (например, 2-монотонных мер), используемых для его построения, он будет обладать соответствующими свойствами вогнутости. В общем же случае целевая функция не будет обладать свойствами выпуклости. Для решения задачи максимизации интеграла Шоке, как недифференцируемой функции, в диссертации рассматривается метод проекции суперградиента. Проанализирован вид супердифференциала и исследована сходимость метода в «хорошем» частном случае 2-монотонных мер. Приведен соответствующий численный пример. В общем случае произвольной монотонной меры (емкости), когда интеграл Шоке уже не будет выпуклой функцией, автор предлагает использовать метод разложение интеграла на вогнутые составляющие, максимум каждой из которых находится независимо. Это интересная с алгоритмической, геометрической и комбинаторной точек зрения процедура составляет основной, на мой взгляд, теоретический результат диссертации. Суть процедуры состоит в разбиении всего n -мерного пространства значений функции ценности на множество, на каждом из которых интеграл Шоке будет вычисляться уже с помощью некоторых новых (построенных в результате преобразования исходной меры) полностью монотонных мер, а исходный интеграл Шоке будет дизъюнктивно выражаться через интегралы Шоке по новым мерам на найденных областях разбиения. Здесь возникает ряд вопросов, например, об оптимальности такой процедуры, о числе элементов разложения и пр. Для случая 2-аддитивной меры автор дает ответы на эти вопросы. В общем случае (для k -аддитивных мер) эти вопросы, как заметил автор, пока остаются открытыми.

Кроме того, во второй главе предложен метод построения сложной модели на основе некоторой графовой структуры ее критериев. Модель (функция агрегирования) строится с помощью интеграла Шоке. При этом, как справедливо отмечает автор, основная проблема состоит в построении монотонной меры (емкости), которая учитывала бы взаимодействия критериев. С целью решения этой задачи все множество исходной экспертной информации о предпочтениях ЛПР, сгруппированное по трем группам: относительной важности критериев (задается соответствующими неравенствами-ограничениями на индекс Шепли), взаимодействию критериев (задается соответствующими неравенствами-ограничениями на индекс взаимодействия) и необходимости-достаточности критериев, определяет множество неопределенности – некоторый многогранник в многомерном пространстве, на котором рассматривается неизвестная монотонная мера. В случае, когда множество неопределенности состоит более чем из одной меры, то автор использует критерий минимаксных потерь Сэвиджа – получается непрерывная минимаксная задача на выпуклом многограннике. Автор анализирует различные подходы к решению этой задачи и различные случаи общей задачи (k -аддитивные меры, 2-монотонные и не 2-монотонные меры). Приведены результаты численных экспериментов.

В третьей главе диссертации автор применяет разработанные методы оптимизации интеграла Шоке к решению двух многокритериальных задач принятия решений. В первом примере рассматривается многокритериальная задача оптимизации проектирования системы информационной безопасности при существующих бюджетных ограничениях. Исходная информация в этом случае представляет собой построенное по экспертным данным, так называемое дерево атак. В этом случае возникает необходимость агрегирования оценок угроз. Поскольку эти угрозы, как правило, взаимозависимы, то естественно для такой агрегации использовать интеграл Шоке. Во втором примере источником данных являются отзывы клиентов гостиниц, оставленные на сайтах бронирования. Каждый отзыв имеет несколько, вообще говоря, взаимодействующих критериев. Кроме того, рассматриваются разные группы клиентов. Автором ставится и решается задача максимизации интеграла Шоке, как агрегирующего оператора этих данных, для оптимизации привлекательности отеля для определенной категории клиентов и при определенных бюджетных ограничениях, а также для всех клиентов в целом.

Таким образом, в диссертационной работе М.В. Тимониным получены следующие основные новые научные результаты:

1) разработаны и исследованы методы максимизации интеграла Шоке по выпуклым и невыпуклым емкостям;

2) разработаны методы построения сложных моделей с помощью многошаговых интегралов Шоке, а также методы анализа вычислительной сложности подобных конструкций;

3) разработаны методы робастной оптимизации интеграла Шоке в случае, когда множество неопределенности состоит более чем из одной меры;

4) разработанные методы применены для решения многокритериальной задачи оптимизации проектирования системы информационной безопасности при существующих бюджетных ограничениях и задачи оптимизации вложения средств для повышения конкурентоспособности в гостиничном бизнесе на основе агрегирования предпочтений клиентов, полученных в результате обработки отзывов.

Обоснованность и достоверность результатов. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждена строгими рассуждениями и корректными математическими доказательствами, аprobацией полученных результатов на ведущих по данной тематике научных форумах (конференциях, семинарах, симпозиумах), публикацией основных результатов в высокорейтинговых рецензируемых научных изданиях. Ввиду этого обоснованность и достоверность основных положений и выводов не вызывает сомнений.

Значимость для науки и практики полученных результатов. Сформулированные в диссертации новые научные результаты являются существенным вкладом, как в теорию многокритериального принятия решений, так и в теорию неточных вероятностей.

Научные и практические результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы для нахождения робастных решений многокритериальных задач принятия решений с учетом корректного моделирования взаимодействия критериев. По всей видимости, результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы для построения оптимальных классификаторов. В этом случае каждый класс будет описываться некоторым интегралом Шоке со своей монотонной мерой, обученной по обучающей выборке и учитывающей взаимодействие признаков.

По работе имеются следующие частные **замечания**.

1. Некоторые разделы имеют слишком общие названия, например, «Введение в методы и задачи системного анализа» (раздел 1.1), «Введение в теорию принятия решений» (разделе 1.4).
2. В обзоре существующих подходов к оптимизации интеграла Шоке следовало бы упомянуть и о других задачах, где интеграл Шоке используется в качестве агрегирующего оператора. Например, применение интеграла Шоке при построении классификаторов и в задаче выделения особенностей (работы M. Grabisch, M. Sugeno, P. Miranda и др.). Кроме того, необходимо было бы обосновать выбор именно интеграла Шоке в качестве агрегирующего оператора, а, например, не интеграла Сугено. А для этого следовало бы подробней остановиться на свойствах интеграла Шоке как агрегирующей функции (см., например, Grabisch M. et al. Aggregation Functions. NY: Cambridge University, 2009).
3. На некоторые важные понятия или используемые утверждения нет ссылок или ссылки даны значительно позже первого использования соответствующих понятий и утверждений. Например, на понятие интеграла Шоке (с.29, основной объект исследования!), комонотонности (с.30), индекс взаимодействия (с.32, ссылка и формула даны только на с.74), некоторые представления интеграла Шоке (с.41). Более того, в диссертации нет ссылки на пионерскую работу самого Шоке [Choquet G. Theory of capacities. Annales de l'Institut Fourier, 5:131-295, 1953], в которой был введен интеграл – основной объект исследования автора.
4. Некоторые используемые понятия не пояснены. Например, понятие расширения Ловаса и его связь с интегралом Шоке (с.40).
5. Есть некоторая «небрежность» при использовании математических терминов, доказательстве некоторых утверждений и используемых обозначениях. Например, в теореме 6 (с.40) не выделены доказательства необходимости и достаточности, в формулировке говорится о наборе функций, а в доказательстве этот набор, по-видимому, обозначен одной буквой; гиперподпро-

- странства названы гиперплоскостями (с.52) и т.д. Не совсем понятно и утверждение (с.52) о невыпуклости в общем случае областей разбиения (судя по алгоритму их построения (с.49), они должны быть выпуклыми); некорректно использован термин «функция расстояния» (с.79) для разности интегралов Шоке.
6. Не совсем понятно, зачем при формировании множества неопределенности (ф. (2.78) на с.76) рассматривать по отдельности случаи важности критериев и их взаимодействия, если индекс взаимодействия является обобщением индекса Шепли.

Общая оценка работы. В диссертационной работе М.В. Тимонина решена задача оптимизации интеграла Шоке, которая находит применение, в частности, при решении многокритериальной задачи принятия решений. Результаты, полученные в работе, имеют как теоретическую, так и практическую ценность и могут быть использованы при разработке систем поддержки принятия решений, при анализе данных, при построении классификаторов и в других задачах. Автор показывает глубокое знание предмета исследования и современного состояния соответствующей области знаний. Кроме того, автор демонстрирует хороший системный подход, как при анализе, так и при решении проблем, рассматриваемых в работе.

Основные положения и результаты диссертации своевременно и полно отражены в 14 публикациях, из них 2 статьи в международных высокорейтинговых рецензируемых журналах (причем одна статья – в ведущем журнале по принятию решений *Annals of Operations Research*, а другая – в ведущем журнале по неточным вероятностям – *Fuzzy Sets and Systems*, 5 статей в журналах, входящих в “Перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации”, утвержденный ВАК, 5 статей в изданиях, индексируемых в базах данных научного цитирования *Web of Science* и/или *Scopus*. Содержание автореферата правильно отражает основное содержание диссертации. Задачи, решаемые в диссертационной работе, имеет хорошие перспективы для дальнейших исследований.

Диссертационная работа удовлетворяет требованиям ВАК РФ к кандидатским диссертациям по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационно-вычислительное обеспечение), а ее автор, **Тимонин Михаил Владимирович**, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
профессор департамента математики
факультета экономических наук
Национального исследовательского университета
«Высшая школа экономики»

«19» ноября 2018 г.



А.Е. ЛЕПСКИЙ

Подпись заверяю

Специалист по кадровому делопроизводству
Отдела кадрового администрирования
Управления персонала
Т.В.Щегольская

19.11.2018

