ДОКЛАДЧИК

Палюх Борис Васильевич
Ученая степень: доктор технических наук
Ученое звание: профессор
Год рождения: 1948
Место работы: Тверской государственный технический университет, заведующий кафедрой «Информационные системы»

Направления деятельности: Системный анализ. Интеллектуальные динамические системы и технологии управления. Средства создания и поддержки проблемно-ориентированных систем, основанных на знаниях, и экспертных систем. Анализ и моделирование систем, основанных на знаниях, системы семантического моделирования. Методы и системы приобретения, представления, обработки и интеграции знаний.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Тверской государственный технический университет
Почтовый адрес: 170023, Россия, г. Тверь, просп. Ленина, 25, ТвГТУ, оф. ХТ-240
e-mail: pboris@tstu.tver.ru

ДОКЛАДЧИК

Иванов Владимир Константинович
Ученая степень: кандидат технических наук
Ученое звание: доцент
Год рождения: 1956
Место работы: Тверской государственный технический университет, директор Центра научно-образовательных электронных ресурсов

Направления деятельности: Системы искусственного интеллекта в поддержке принятия решений. Программные реализации методов текстового поиска и интеллектуального анализа данных. Методы и системы приобретения, представления, обработки и интеграции знаний. Базы данных и базы знаний. Электронные образовательные системы и сервисы. Наполнение электронных библиотек и коллекций.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Тверской государственный технический университет
Почтовый адрес: 170008, Россия, г. Тверь, ул. Озерная, 7, корп. 9, кв. 47
e-mail: mtivk@mail.ru

ТЕМА ДОКЛАДА

НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Введение

Задачи принятия решения могут отличаться практическим отсутствием информации о состояниях активных объектов. Такая ситуация обуславливает принятие решений в условиях неопределенности. С другой стороны, может быть доступно точное знание вероятностей состояний объектов, что вызывает необходимость принятия решений в условиях и с учетом рисковых ограничений. Диагностические процедуры для сложных технических систем, функционирующих в динамической среде, занимают некоторое промежуточное положение. Иными словами, информация о состояниях диагностируемых объектов или их компонентов является неточной и/или неполной.

Например, имеется задача повышения долговечности сложных технических систем, таких как космические аппараты. Модель для диагностики такого объекта описывается как многоагентная система, в которой агенты (элементы системы) взаимодействуют между собой и с управляющим центром. Возможные подходы к решению задачи включают использование теории вероятностей, теории нечетких множеств, интервальной математики.

Одним из математических инструментов для решения таких задач является теория Демпстера-Шафера также называемая математической теорией свидетельств, теорией функций доверия или теорией случайных множеств. В статье кратко описывается приложение теории Демпстера-Шафера для моделирования, диагностики и оценки состояния сложных технических систем.

Основные положения теории Демпстера-Шафера

Итак, теория Демпстера-Шафера [1, 2] дает математическую основу для моделирования и вычисления вероятности события после комбинирования отдельных частей исходной информации об этом событии, полученных из разных источников. Исходной информацией служат, как правило, неточные (интервальные) значения экспертных оценок, измерений или наблюдений. Важными концепциями теории являются функции доверия и правдоподобия.

Функция доверия выражает степень уверенности в наличии заданного свойства у объектов:

$$Bel(C_i) = \sum_{C_j \subseteq C_i} m(C_j)$$

C_i – событие, соответствующее наличию заданного свойства у объекта (множества объектов);

$C_i \subseteq A$; C – полное множество событий (результат решения задачи);

$m(C_j)$ – базовое распределение вероятностей события C_j;

$m(C_j) \in [0,1]$.

Также $Bel(\emptyset) = 0$, $Bel(C_i) \in [0,1]$ и $Bel(A) = 1$.

Функция правдоподобия выражает степень правдоподобия наличия заданного свойства у объектов:

$$Pl(C_i) = 1 - Bel(C_\iota) = 1 - \sum_{C_i \cap C_j = \emptyset} m(C_j)$$

В целом, предполагая существование $p(C_i)$ – истинной вероятности наличия заданного свойства у объектов из $C_i \subseteq A$, имеем

$$Bel(C_i) \le p(C_i) \le Pl$$

где $Bel(C_i)$ и $Pl(C_i)$ – нижняя и верхняя границы $p(C_i)$.

Исследования и разработки, связанные с использованием теории Демпстера-Шафера, достаточно интенсивно развиваются во всем мире. Например, исследование современных специализированных направлений развития и области приложения теории Демпстера-Шафера, проведенное авторами, показывает очевидный нелинейный рост публикаций по указанной тематике (см. рис. 1). Анализ количества публикаций за последние 25 лет, тематика которых касается теории Демпстера-Шафера и которые зафиксированы в одной из крупнейших в мире базе данных научно-технических статей IEEE Xplore Digital Library (http://ieeexplore.ieee.org) дает аналогичные результаты (см. рис. 2).

Области приложения теории Демпстера-Шафера

Ниже представлены сведения о применении теории Демпстера-Шафера для решения задач принятия решений в условиях неточных (интервальных) экспертных оценок, измерений или наблюдений. Рассмотрены следующие области приложений теории Демпстера-Шафера:

- Диагностические системы.
- Производственные системы.
- Анализ экспертных оценок.
- Технологии дистанционного зондирования.
- Анализ и оценка состояния конструкций.

В области диагностических систем исследования и разработки в основном проводятся по следующим направлениям (см., например, [3]):

- Диагностика химико-технологических процессов.
- Анализ дефектов сварных швов.
- Ультразвуковой и вихретоковый контроль изделий.
- Контроль качества водораспределительных сетей.
- Оценки вероятности флаттера и оценка риска флаттера.
- Диагностика двигателей.
- Диагностика сбоев функциональных блоков (компонентов).
- Диагностические системы с многоступенчатым выбором решений.
- Использование мультидатчиков в беспроводных сенсорных сетях.
- Защита сетей от неправильного (непредусмотренного) использования с алгоритмом оповещения.
- Диагностика высоковольтных прерывателей.

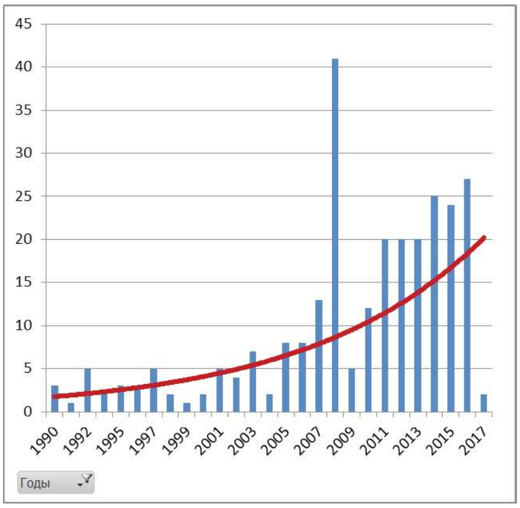

Рис. 1.

Число публикаций по специализированным направлениям применения теории Демпстера-Шафера (источник – ресурсы Интернет)

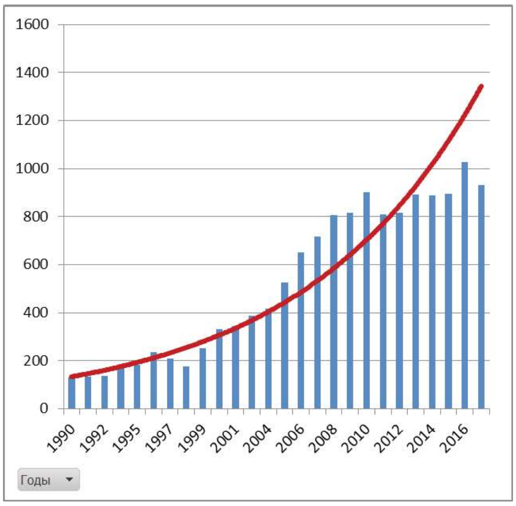

Рис. 2.

Число публикаций, тематика которых касается теории Демпстера-Шафера (источник – IEEE Xplore Digital Library)

В области производственных систем актуальны следующие направления:

- Выбор системы управления данными об изделии для машиностроительного предприятия.
- Решение задач в САПР и инженерных расчётах (CAD/CAE).
- Робототехника: принятие решений автономным роботом с помощью вероятностных моделей.
- Обеспечение надежности производственных систем (например, электронно-измерительных средств).

В области анализа экспертных оценок основные направления разработок следующие:

- Анализ групповых экспертных оценок в конфликтных ситуациях.
- Обработка экспертных оценок при проведении исследований.
- Анализ экспертных оценок при управлении высокотехнологичными проектами, например, при формировании групп исполнителей.
- Кластеризация и ранжирование групповых экспертных оценок.

Актуальные направления в области технологий дистанционного зондирования:

- Классификация объектов и групп объектов на много- и гиперспектральных аэрокосмических изображениях.
- Улучшение качества изображений, полученных в результате дистанционного зондирования, путем обнаружения изменений в изначально дефектных снимках.
- Системы геолокации: навигационные системы с беспроводными датчиками, системы обеспечения безопасности мореплавания (предотвращение инцидентов).

Исследования и разработки в области анализа и оценки состояния конструкций:

- Разработка методов расчета надежности конструкций.
- Оценка состояния и анализ дефектов трубопроводов, соединений и люков.

Пример практического использования теории Демпстера-Шафера

Ниже описывается пример решение задачи из области разработки диагностических систем для анализа состояния сложных технических систем. Подходы к решению этой и других подобных задач предлагаются в разрабатываемой интеллектуальной системе оптимального управления эволюцией многостадийных процессов в нечеткой динамической среде [4].

Нормальное функционирование изделия – это отсутствие кризисных состояний или ухудшений показателей эффективности (УПЭ X_k у его компонентов (агентов) $A_i \in A_k$.

Признаком кризисного состояния или УПЭ является выход значения $X_k = [\underline{x_k}, \overline{x_k}]$ за допустимые нормативные значения $D_k = [\underline{d_k}, \overline{d_k}]$.

При проверке диагностических гипотез выделяют следующие типы ошибок:

- ошибки 1-го рода или «ложная тревога»;
- ошибки 2-го рода или «отсутствие тревоги при УПЭ».

Пусть A^* – множество агентов, находящихся в кризисном состоянии или имеющих УПЭ. Тогда диагностическая процедура есть поиск решений следующего логического уравнения:

$$F: P^* \to A^*$$

где

F – предикатная функция вида $F = \wedge(\vee A_i)$;

$P^* = \{P_k | P_k = 1\}$ – множество зарегистрированных УПЭ;

P_k – значение индикаторной функции, $P_k = 1$.

Индикаторная функция P_k из булевой функции признака УПЭ превращается в непрерывную функцию, определенную на интервале [0, 1], которая показывает степень УПЭ.

При $X_k > \overline{d_k}$ функция P_k имеет вид:

$$P_k = \begin{cases} 0, \text{ если } \overline{x_k} \le \overline{d_k} \\ 1, \text{ если } \underline{x_k} \ge \overline{d_k} \\ \dfrac{\overline{x_k} - \overline{d_k}}{\overline{x_k} - \underline{x_k}}, \text{ если } \underline{x_k} < \overline{d_k} < \overline{x_k} \end{cases}$$

А при $X_k < \underline{d_k}$ функция P_k имеет вид:

$$P_k = \begin{cases} 0, \text{ если } \underline{x_k} \ge \underline{d_k} \\ 1, \text{ если } \overline{x_k} \le \underline{d_k} \\ \dfrac{\underline{d_k} - \underline{x_k}}{\overline{x_k} - \underline{x_k}}, \text{ если } \underline{x_k} < \underline{d_k} < \overline{x_k} \end{cases}$$

Если $P_k \neq 0$, то этот факт интерпретируется как подозрение на УПЭ по -му показателю. При этом активизируется нечеткое множество возможно кризисных агентов $A_k = \{C_i, m_k(C_i)\}$, где C_i – событие, состоящее в наличии кризисного состояния у одного или нескольких агентов; $, m_k(C_i)$ – мера вероятности, отнесенная к C_i. Условия возникновения диагностируемого кризисного состояния $s \in S$ агента A_i следующие:

$(\forall s \in S)(P_k = 0) \leftrightarrow (A_k \cap A^* = \emptyset)$ – необходимое условие;

$(\forall s \in S)(P_k = 1) \leftrightarrow (A_k \cap A^* = A^*)$ – достаточное условие.

Представим, что степень влияния X_k на кризисное состояние агента A_i оценивают эксперты числом в диапазоне [0; 100]. Результаты экспертной оценки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспертной оценки

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
X_1	20	40			60
X_2	15		40		
X_3	90	50	30	30	

Пусть $X_1 = [42{,}8\%; 52{,}4\%]$ и $X_3 = [53{,}0\%; 58{,}0\%]$ с нормативным интервалом $S = [50\%; 55\%]$.

Вероятности ухудшения показателей X_1 и X_3:

$$P_{x1} = (50{,}0 - 42{,}8)/(52{,}4 - 42{,}8) = 0{,}75$$
$$P_{x3} = (58{,}0 - 55{,}0)/(58{,}0 - 53{,}0) = 0{,}6.$$

Из таблицы имеем активизированные множества:

$$A_{x1} = \{(a_1; 0{,}2), (a_2; 0{,}4), (a_5; 0{,}6)\}$$
$$A_{x3} = \{(a_1; 0{,}9), (a_2; 0{,}5), (a_3; 0{,}3), (a_4; 0{,}3)\}.$$

Нормализованные распределения вероятностей кризисных состояний:

$$m_{x1} = \langle a_1; a_2; a_5 \rangle = \langle 0{,}17; 0{,}33; 0{,}50 \rangle \text{ и}$$
$$m_{x3} = \langle a_1; a_2; (a_3, a_4) \rangle = \langle 0{,}53; 0{,}30; 0{,}15 \rangle.$$

Перераспределенные распределения этих вероятностей вычисляются следующим образом:

$$m_k(C_i) = m_k(C_i) * P_k, m(A) = 1 - P_k.$$

где

A – множество возможных исходов диагноза;

$1 - P_k$ – степень сомнения в УПЭ по -му показателю.

Таким образом:

$$m'_{x1} = \langle a_1; a_2; a_5; A \rangle = \langle 0{,}13; 0{,}25; 0{,}48; 0{,}25 \rangle \text{ и}$$
$$m'_{x3} = \langle a_1; a_2; (a_3, a_4); A \rangle = \langle 0{,}32; 0{,}18; 0{,}10; 0{,}40 \rangle.$$

В соответствии с правилом Демпстера объединение различных свидетельств с распределениями вероятностей и выполняется следующим образом:

$$m(A_N) = \frac{1}{1 - m(\emptyset)} * \sum_{C_i \cap C_j = A_N} m_1(C_i) * m_2(C_j)$$

где

$m(A_N)$ – функция объединения свидетельств $m_1(C_i)$ и $m_2(C_j)$, соответствующих наличию у объекта свойства A_N;

$m(\emptyset) = \sum_{C_i \cap C_j = \emptyset} m_1(C_i) * m_2(C_j)$.

Исходя из данных рассматриваемого примера:

$$m(\emptyset) = 0{,}08 + 0{,}12 + 0{,}02 + 0{,}07 + 0{,}01 +$$
$$+ 0{,}02 + 0{,}04 = 0{,}35.$$

Объединения различных $\mathrm{m_{xi}}$ на основе правила Демпстера представлены в табл. 2.

Таблица 2

Пример использования правила Демпстера

	a_1 0,13	a_2 0,25	a_5 0,48	A 0,25
a_1 0,32	a_1 0,04	∅ 0,08	∅ 0,12	a_1 0,08
a_2 0,18	∅ 0,02	a_2 0,04	∅ 0,07	a_2 0,04
$a_3 \vee a_4$ 0,10	∅ 0,01	∅ 0,02	∅ 0,04	$a_3 \vee a_4$ 0,02
A 0,40	a_1 0,05	a_2 0,10	a_5 0,19	A 0,10

Для гипотез о кризисных агентах:

$$m(a_1) = (0{,}04 + 0{,}08 + 0{,}05)/0{,}65 = 0{,}26;$$
$$m(a_2) = (0{,}04 + 0{,}04 + 0{,}10)/0{,}65 = 0{,}28;$$
$$m(a_3 \vee a_4) = 0{,}02/0{,}65 = 0{,}03;$$
$$m(a_5) = 0{,}19/0{,}65 = 0{,}29;$$
$$m(A) = 0{,}10/0{,}65 = 0{,}15.$$

Результирующее распределение вероятностей:

$$m = \langle a_1; a_2; (a_3, a_4); a_5; A \rangle =$$
$$= \langle 0{,}26; 0{,}28; 0{,}03; 0{,}29; 0{,}15 \rangle.$$

Выводы по результатам рассмотренного примера представлены в табл. 3.

Итог решения задачи примера

Традиционные методы (использование нечетких множеств)	Распознавания кризисных ситуаций агентов с помощью теории Демпстера-Шафера
Невыполнение условия необходимости ведет к ошибкам 2-го рода, а невыполнение условия достаточности – к ошибкам 1-го рода.	Снижение требований условий необходимости и достаточности до вида: $(\forall s \in S)(P_k = 0) \leftrightarrow P^* \neq \emptyset$
Результат решения: $A^* = \{(a_1; 0{,}2), (a_2; 0{,}4)\}$	Результат решения: $a_1[0{,}26;0{,}41], a_2[0{,}28;0{,}43], a_3[0{,}03;0{,}18], a_4[0{,}03;0{,}18], a_5[0{,}29;0{,}44], A[1{,}0;1{,}0]$
Отбрасывание гипотезы о кризисном состоянии агента A_5 приводит к ошибке 2-го рода.	Оставление гипотезы о кризисном состоянии агента A_5, установление причины кризиса у агента A_5.

Таблица 3

Заключение

Подход к учету неопределенности при диагностике состояния сложных технических систем дает ряд преимуществ по сравнению с байесовским подходом или подходом, основанном на использовании нечетких множеств.

В частности, применение правила Демпстера позволяет преобразовать результаты многих оценок таким образом, чтобы сделать их непротиворечивыми и использовать для объединения с результатами математического моделирования.

Также, использование теории свидетельств позволяет снизить условия необходимости и достаточности за счет перераспределения части уверенности по всему множеству возможных исходов диагноза.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 2.1777.2017/4.6) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-07-00358).

Список литературы

1. Shafer G. (1976) A Mathematical Theory of Evidence, Princeton University Press, 1976.

2. Yager R., Liping Liu (2010) Classic Works of the Dempster-Shafer Theory of Belief Functions, London: Springer.

3. Horst C. (eds.) (2013) Handbook of Technical Diagnostics. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

4. Палюх, Б.В. Архитектура интеллектуальной системы оптимального управления эволюцией многостадийных процессов в нечеткой динамической среде / Б.В. Палюх , А.Н. Ветров, И.А. Егерева // Программные продукты и системы. 2017. Т. 30. № 4. – С. 619–624.