

# **РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПОЛУЧЕНИЮ ДАННЫХ О ВРЕМЕНИ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ ПОДДЕРЖАНИЯ НЕПРОТИВОРЕЧИВОСТИ АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ БАЙЕСОВСКОЙ СЕТИ<sup>1</sup>**

Харитонов Н. А., магистр второго курса кафедры информатики  
СПбГУ, мл. научн. сотрудник лаборатории ТиМПИ СПИИРАН,  
nak@dscs.pro

Тулупьев А.Л., к.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры информатики  
СПбГУ, alt@dscs.pro

## **Аннотация**

В работе представлены результаты эксперимента, производимого в целях получения статистических оценок времени работы реализаций алгоритмов поддержанной экстернальной и интернальной непротиворечивости алгебраических байесовских сетей с цепной структурой.

## **Введение**

Вероятностные графические модели относятся к классам машинно обучаемых моделей [1]. При этом подходы к их обучению отличны от обучения нейронных сетей [2, 3]. Алгебраические байесовские сети [4, 5, 6] являются вероятностными графическими моделями, к которым также относятся байесовские сети доверия [7, 8]. В целях получения статистических оценок времени работы реализации алгоритмов поддержания экстернальной и интернальной непротиворечивостей, был проведен вычислительный эксперимент, дизайн которого описывается в данной статье.

---

<sup>1</sup>Работа выполнена в рамках проекта по государственному заданию СПИИРАН № 0073-2019-0003, при финансовой поддержке РФФИ, проект №18-01-00626 – Методы представления, синтеза оценок истинности и машинного обучения в алгебраических байесовских сетях и родственных моделях знаний с неопределенностью: логико-вероятностный подход и системы графов.

## Алгебраические байесовские сети

Алгебраические байесовские сети представляют собой ненаправленный граф с фрагментами знаний в узлах [4]. Каждый фрагмент знаний является идеалом элементов, которыми могут быть конъюнкты, кванты или дизъюнкты [5]. Каждому элементу фрагмента знаний сопоставляются скалярные или интервальные оценки вероятности его истинности [6]. Пример алгебраической байесовской сети с фрагментами знаний в ней приведен на рисунке 1.

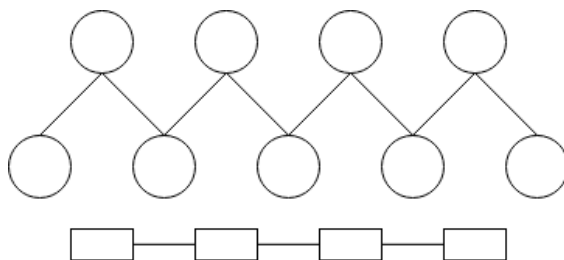


Рис. 1: Пример алгебраической байесовской сети

В целях проверки корректности имеющихся в сети оценок вероятности истинности элементов выделяется четыре степени непротиворечивости [4]:

- Алгебраическая байесовская сеть является локально непротиворечивой, если каждый отдельно взятый фрагмент знаний в сети непротиворечив;
- Алгебраическая байесовская сеть является экстерналино непротиворечивой, если она локально непротиворечива и оценки истинности конъюнкта, входящего в два и более фрагмента знаний совпадают;
- Алгебраическая байесовская сеть является интерналино непротиворечивой, если она локально непротиворечива и для любого конъюнкта для любого скалярного значения из интервала оценки его истинности можно выбрать такие оценки во всех фрагментах знаний, что получившаяся алгебраическая байесовская сеть будет экстерналино непротиворечивой;
- Алгебраическая байесовская сеть является глобально непротиворечивой, если ее с имеющимися оценками можно погрузить

в непротиворечивый объемлющий фрагмент знаний и при этом оценки вероятностей в сети не изменятся.

## Интернальная непротиворечивость

Ниже приведены полученные в результате эксперимента графики времени поддержания непротиворечивости алгебраических байесовских сетей. На графике (рис. 2) представлены все полученные средние в зависимости от числа атомов в сети при поддержании интернальной непротиворечивости.

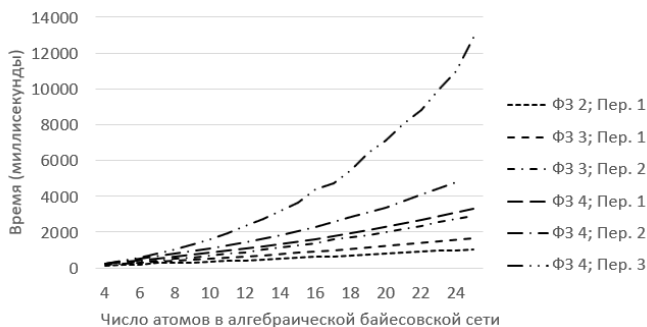


Рис. 2: Зависимость статистик времени поддержания интернальной непротиворечивости алгебраической байесовской сети с линейной структурой от числа атомов в ней для фрагментах знаний над 2–4 атомами с 1–3 атомами на пересечениях

Как показывают представленные данные, при увеличении числа атомов во фрагменте знаний среднее время поддержания непротиворечивости экспоненциально возрастает с возрастанием числа атомов в сети. Аналогичная тенденция наблюдается при сравнении числа атомов на пересечениях фрагментов знаний: чем больше атомов, тем дольше поддерживается непротиворечивость.

Поскольку при одинаковом числе атомов число фрагментов знаний в сетях различно, было решено выявить зависимость между числом фрагментов знаний в сети и временем поддержания непротиворечивости. Она представлена на графике (рис. 3). В связи с тем, что при числе атомов в сети, равном 25, в не можно поместить:

- 8 фрагментов знаний над 4 атомами и 1 атомами на пересечениях,

- 12 фрагментов знаний над 4 атомами и 2 атомом на пересечениях,
- 8 фрагментов знаний над 3 атомами и 1 атомом на пересечениях,

график не для всех измерений достигает до отметки в 14 фрагментов знаний.

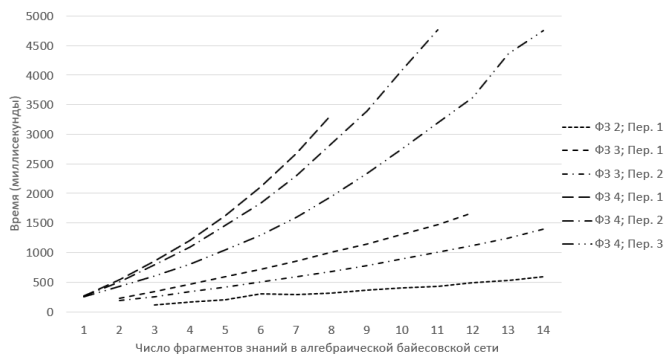


Рис. 3: Зависимость статистики времени поддержки интернальной непротиворечивости алгебраической байесовской сети с линейной структурой от числа фрагментов знаний в ней для фрагментах знаний над 2–4 атомами с 1–3 атомами на пересечениях

Полученный график демонстрирует, что зависимость от числа атомов во фрагменте знаний сохраняется. Однако при фиксированном числе фрагментов знаний в сети, наблюдается следующая тенденция: чем больше атомов на пересечениях, тем меньше время поддержания непротиворечивости.

## Экстернальная непротиворечивость

Ниже приведены полученные в результате эксперимента графики времени поддержания непротиворечивости алгебраических байесовских сетей. На графике (рис. 4) представлены все полученные средние в зависимости от числа атомов в сети.

Как показывают представленные данные, при увеличении числа атомов во фрагменте знаний среднее время поддержания непротиворечивости линейно возрастает с возрастанием числа атомов в сети. Аналогичная тенденция наблюдается при сравнении числа атомов на

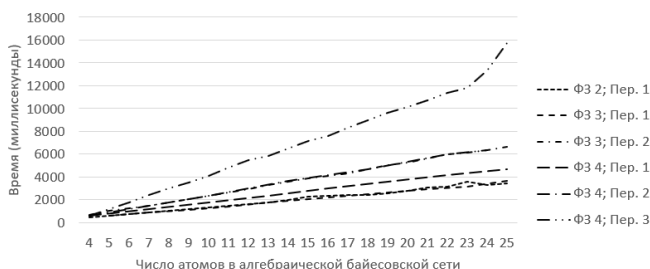


Рис. 4: Зависимость статистик времени поддержания экстернальной непротиворечивости алгебраической байесовской сети с линейной структурой от числа атомов в ней для фрагментах знаний над 2–4 атомами с 1–3 атомами на пересечениях

пересечениях фрагментов знаний: чем больше атомов, тем дольше поддерживается непротиворечивость.

Поскольку при одинаковом числе атомов число фрагментов знаний в сетях различно, было решено выявить зависимость между числом фрагментов знаний в сети и временем поддержания непротиворечивости. Она представлена на графике (рис. 5). В связи с тем, что при числе атомов в сети, равном 25, в не можно поместить:

- 8 фрагментов знаний над 4 атомами и 1 атомами на пересечениях,
- 12 фрагментов знаний над 4 атомами и 2 атомом на пересечениях,
- 8 фрагментов знаний над 3 атомами и 1 атомом на пересечениях,

график не для всех измерений доходит до отметки в 14 фрагментов знаний.

Полученный график демонстрирует интересную картину: время поддержания экстернальной непротиворечивости при одинаковом числе фрагментов знаний в сети не зависит от числа атомов на пересечении, а зависит только от числа атомов во фрагментах знаний.

## Рекомендации по структуре сети на основе данных

На основе представленной в предыдущих разделах информации, можно выделить следующие рекомендации при работе с алгебраическими байесовскими сетями.

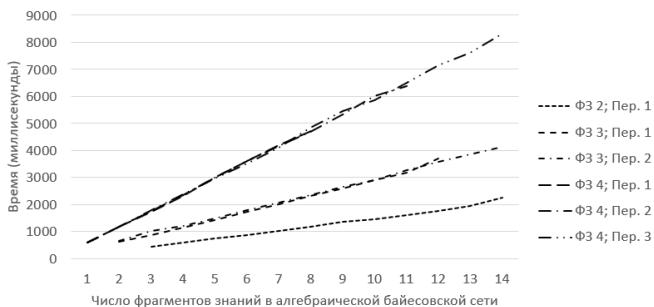


Рис. 5: Зависимость статистик времени поддержания экстернальной непротиворечивости алгебраической байесовской сети с линейной структурой от числа фрагментов знаний в ней для фрагментах знаний над 2–4 атомами с 1–3 атомами на пересечениях

В целях относительного ускорения времени работы с алгебраической байесовской сетью, у которой необходимо поддерживать интернальную непротиворечивость, следует стремиться сделать ее структуру более разреженной при известном числе атомов во фрагментах знаний и более плотной при фиксированном числе фрагментов знаний.

В целях относительного ускорения времени работы с алгебраической байесовской сетью, у которой необходимо поддерживать экстернальную непротиворечивость, следует стремиться использовать фрагменты знаний с как можно меньшим числом атомов в них, при этом не имеет значение число атомов на пересечениях.

## Выводы

Полученные результаты позволяют выдвинуть требования к размеру сети и ее структуре и в дальнейшем использовать алгебраические байесовские сети в рамках исследований социоинженерных атак [9, 10].

## Литература

- [1] *Bandeir, M.C.G.S.P., Correia A.R., Martins M.R.* General model analysis of aeronautical accidents involving human and organizational factors // *Journal of Air Transport Management* (69), p. 137–146. (2018).

- [2] *Jordan M.I.* Serial order: A parallel distributed processing approach // Institute for Cognitive Science Report, 8604. University of California, San Diego, 1986.
- [3] *Elman J.L.* Finding structure in time // Cognitive Science, 1990. P. 179–211.
- [4] *Тулупьев А.Л., Николенко С.И., Сироткин А.В.* Основы теории байесовских сетей: учебник. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2019. 399 с.
- [5] *Тулупьев А.Л., Николенко С.И., Сироткин А.В.* Байесовские сети: логико-вероятностный подход. СПб.: Наука, 2006. 607 с.
- [6] *Тулупьев А.Л., Сироткин А.В., Николенко С.И.* Байесовские сети доверия: логико-вероятностный вывод в ациклических направленных графах. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2009. 400 с.
- [7] *Cai Z., Si S., Sun S., Dui H.* Learning Bayesian network structure with immune algorithm // Journal of Systems Engineering and Electronics 26(2), p. 282–291. (2015).
- [8] *Cheng T., Wang P., Lu Q.* Risk scenario prediction for sudden water pollution accidents based on bayesian networks // International Journal of Systems Assurance Engineering and Management, 9(5), p. 1165–1177. (2018).
- [9] *Хлобыстова А.О., Абрамов М.В., Тулупьев А.Л., Золотин А.А.* Поиск кратчайшей траектории социоинженерной атаки между парой пользователей в графе с вероятностями переходов // Информационно-управляющие системы. 2018. № 6 (97). С. 74–81.
- [10] *Абрамов М.В.* Автоматизация анализа социальных сетей для оценивания защищённости от социоинженерных атак // Автоматизация процессов управления. 2018. №1(51). С. 34–40.