

# Когнитивное наблюдение многомерных фрактальных стохастических структур сложных систем как инструмент ХАИ

В. Л. Горохов<sup>1</sup>, И. А. Брусакова<sup>1</sup>, С. И. Широков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>2</sup>Санкт-Петербургское отделение Специальной астрофизической обсерватории РАН

e-mail: vlgorohov@mail.ru

**Аннотация.** Рассматриваются методы и средства когнитивного динамического проецирования фрактальных стохастических структур сложных систем. Эти средства могут быть использованы в качестве объяснительного инструмента для трактовки результатов работы систем искусственного интеллекта (ИИ) над фрактальными многомерными данными. Предлагаемые методы помимо объясняющего эффекта могут давать количественные оценки многомерным статистическим связям в терминах неаддитивной статистики (таких как: энтропия Реньи или Тсалиса, условная концентрация фрактального процесса, спектр фрактальных размерностей) присущих, как идеологии мультифрактального анализа, так и идеологии глубокого обучения.

**Ключевые слова:** средства когнитивного динамического проецирования, энтропия Реньи, неэкстенсивная статистическая механика, различающая информация Реньи, мультифрактальный анализ, фрактальная размерность.

## I. Постановка задачи. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время достижения теории нелинейной неравновесной термодинамики (в частности: неаддитивной статистической термодинамики) позволяют на новом уровне описывать сложные (киберфизические) системы, используя инструменты многомерного мультифрактального анализа больших данных [1]. Достижения и разработка принципов неэкстенсивной статистической механики и равновесной термодинамики открытых систем дали возможность создания таких перспективных инструментов. Отличительная особенность последних состоит в том, что они наряду с глобальными характеристиками пространственных или временных стохастических процессов, позволяют вскрыть особенности их локальной структуры.

Актуальность данной тематики растет в связи с развитием теоретико-информационного подхода к моделированию процессов самоорганизации в открытых киберфизических системах со стохастичностью. В рамках цифровизации появилась возможность объединения динамической и информационной частей описания сложных систем в единую неразрывную сущность (киберфизическую систему). И так, в условиях конкуренции информационных и физических процессов

эволюционное развитие сложной системы в значительной мере начинает определяться информационными свойствами, включая информационное взаимодействие с внешним окружением (например, Зубарев, 1971; Климонтович, 1990; Зубарев и др., 2002).

Таким образом, представление многомерных данных (описывающих состояние и поведение киберфизических систем) методами мультифрактального анализа активно используется в различных предметных областях, таких как экономика, медицина, техника связи, физика и т.д. В этих предметных областях уже на практике показано, что для сложных систем особую важность имеет именно фрактальная природа этих систем [1]. Идея исследования фракталов на основе меры Хаусдорфа принадлежит Б. Мандельброту (Mandelbrot, 1975, 1977, 1982; Мандельброт, 2002). Им были получены нетривиальные результаты и построена соответствующая математическая теория. При этом центральная роль в определении фрактальной размерности была отведена энтропии Реньи (Renyi, 1961, 1970). В настоящее время интерес к изучению свойств фрактальных многомерных данных на основе алгоритмов оценки энтропии Реньи, Тсалиса фрактальной и мультифрактальной размерности продолжает расти (см. Johal, Rai, 2000; Tsallis, 1995). Эти алгоритмы реализуются с помощью многомерной статистики и технологии искусственного интеллекта (ИИ).

Однако эти технологии наряду с очевидными достоинствами обладают и рядом недостатков, обусловленных многомерностью данных:

- сети искусственного интеллекта (ИИ), не обладают свойством прозрачности (transparency) т.е. не могут быть понятны априори, без применения методов интерпретации;
- сети ИИ по своей сути, являются «чёрным ящиком» (black-box), то есть процесс принятия ими решения неясен, а прозрачными являются лишь вход и выход сети. [2, 3]

Эти недостатки серьезно сказываются на доверии к технологии ИИ. Для преодоления этих недостатков сегодня активно разрабатываются инструменты в рамках объяснительного искусственного интеллекта ХАИ [2, 3]. Одним из перспективных когнитивных инструментов в

спектре методов объяснительного искусственного интеллекта ХАИ является когнитивное динамическое проецирование (или когнитивная машинная графика) SW [4]. Метод SW как инструмент ХАИ основан на способностях человека визуально замечать геометрические особенности когнитивных псевдотрехмерных образов многомерных данных. Зная предметную область (породившую эти данные), наблюдая особенности когнитивных образов этих данных, человек сразу способен дать предметную интерпретацию этих многомерных данных. Например, можно выявить статистическую связь между множеством характеристик объектов данной предметной области, их таксономию. Более того, когнитивные образы можно количественно описать средствами 3D графики [5]. Подобные алгоритмы дают новые технологии для количественного описания мультифрактальных структур. Кроме того, эти технологии помогают использовать наблюдаемые свойства многомерных корреляций для управления алгоритмами оценки корреляционной и информационной фрактальной размерности, которые определяют скорости самоорганизации и темпы упорядочивания внутренних структур киберфизических систем. Другими словами, прямое наблюдение с помощью SW корреляционных фрактальных структур данных в конкретной предметной области позволяет человеку подтверждать или отвергать решения, основанные на оценках корреляционных связей и размерностей фрактальных структур. В настоящее время метод SW был успешно использован для решения разных задач в астрофизике, экономике, экологии, логистике, техносферной безопасности и пр. [4,5].

В данной работе предлагается использовать средства SW в качестве ХАИ для мультифрактального анализа многомерных данных, источником которых выступают сложные (киберфизические) системы. Рассматривается пример выявления фрактальных свойств в распределении скоплений галактик на масштабах более 500 мпс. [7].

## II. КОГНИТИВНЫЕ ОБРАЗЫ МНОГОМЕРНЫХ ФРАКТАЛЬНЫХ СТРУКТУР

В качестве примера, иллюстрирующего означенные выше положения, рассматривается задача изучения фрактальных особенностей крупномасштабной структуры метagalактики [7]. Для этого используются актуальные обзоры и каталоги SDSS, COMBO-17, COSMOS, FDF, HUDF, ALHAMBRA, PANTHEON [7]. Подобные массивы многомерных данных представляют собой каталоги астрофизических объектов, снабженные многомерным набором измеренных характеристик этих объектов. Это классический пример многомерных данных - BIG DATA. Космологическая природа объектов такова, что их характеристики обладают многомерными статистическими связями, отражающими, в том числе, и многомерную фрактальную структуру этих объектов. Выявление этих мультифрактальных структур осуществляется в практической космологии средствами условной концентрации фрактального процесса (Пиетронеро, Силос-Лабини 1998), многомерного корреляционного анализа [7]. Пример такой BIG DATA

(это крупномасштабная пространственная фрактальная структура метagalактики) показана на рис. 1.

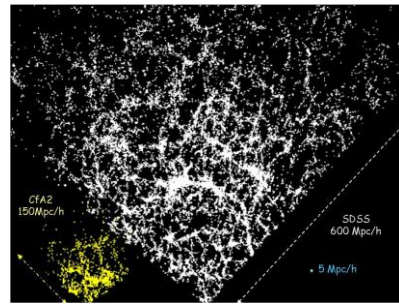


Рис. 1. Крупномасштабная структура обзора SDSS

Количественная оценка фрактальной структуры дается с помощью условной концентрации стохастического фрактального процесса, в которой используется фрактальная размерность. Учитывая многомерность данных (наличие набора измеряемых характеристик объектов, например светимость, масса и др. характеристики) здесь используется мультифрактальные оценки спектра фрактальной размерностей. Используемые алгоритмы мультифрактального анализа все же требуют для своего применения ряда исходных предположений типа эргодичности, однородности, иерархичности, самоподобия структур данных. Если эти предположения не верны, то и алгоритмы работают неконтролируемым образом. Поэтому активное использование мультифрактального анализа (как и всего арсенала многомерной статистики, включая нейронные сети глубокого обучения) наталкивается на существенную априорную неопределенность. И именно здесь средства объяснительного интеллекта ХАИ в частности средства когнитивной машинной могут быть полезными. В данном примере показана (рис. 2, 3, 4) подтверждающая демонстрация многомерных фрактальных и корреляционных структур с помощью средств когнитивной динамической проекции (SW). На рис. 1. приведен когнитивный образ статистической связи двух характеристик космологических объектов (гамма-барстеров), который подтвердил корреляционную зависимость Амати [7]. С помощью этой зависимости удалось провести измерение расстояний между объектами для мультифрактальных структур на масштабах сотен мегапарсек [7]. На рис. 2. показан псевдо-трехмерный образ зависимости двух характеристик космологических объектов (гамма-барстеров), который демонстрирует элементы одного из уровней мультифрактальной структуры. На рис. 3. отражены (средствами SW) многомерные структурные особенности зависимости Амати  $E_{iso} - E_{pi}$ , включая и многомерные фрактальные свойства. Эта зависимость двух энергетических характеристик гамма барстеров обеспечивает независимый способ измерения расстояний в космологии. На рис. 4. показаны когнитивные образы проекций многомерных распределений, отражающих фрактальные свойства характеристик космологических объектов. Проекция сделана на ключевые характеристики  $\log HR - \log T$  объектов (гамма-барстеров). Здесь также можно наглядно наблюдать структурные свойства мультифракталов.

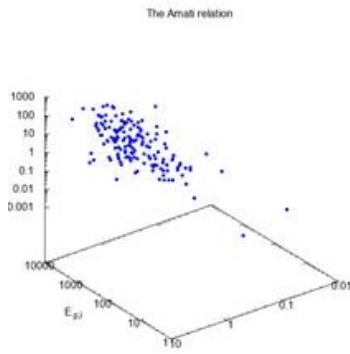


Рис. 2. Псевдо-трехмерный образ зависимости двух характеристик космологических объектов (гамма-барстеров)

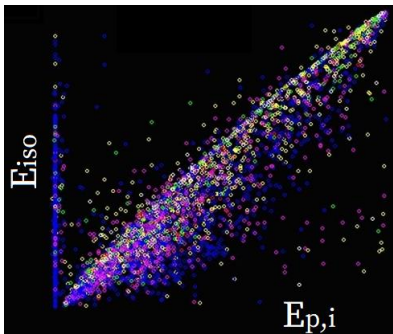


Рис. 3. Многомерные структурные особенности зависимости Аматти, включая и многомерные фрактальные свойства

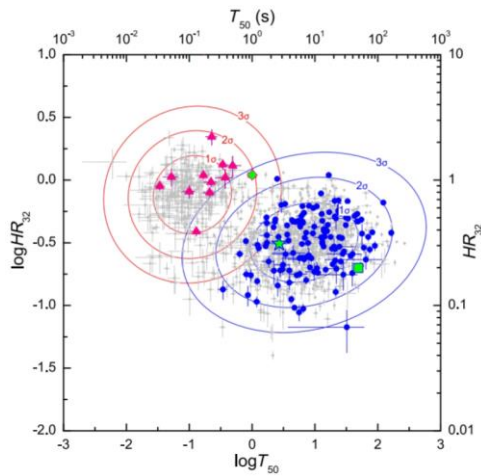


Рис. 4. Когнитивные образы проекций многомерных распределений объектов

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый подход к когнитивной визуализации мультифрактальных свойств структур киберфизических систем развивает тенденцию ХАИ для многомерной

обработки экспериментальных данных в условиях глубокой априорной неопределенности в отношении характеристик мультифрактальных структур объектов киберфизических систем.

В этом подходе измерения мультифрактальных свойств, таких как спектр мультифрактальных размерностей дополняется когнитивной визуализацией этих свойств, усиливая объясняющую силу этих алгоритмов. Это способствует преодолению глубокой априорной неопределенности присущей поведению киберфизических систем. На фундаментальную роль этой неопределенности для киберфизических систем в настоящее время активно указывают такие специалисты статистики как Н. Н. Талеб и Д. Канеман.

Появляется возможность визуализации этих многомерных процессов средствами когнитивной машинной графики, что обеспечивает своевременное выявление аномальных феноменов в глубоком обучении нейронных сетей.

Кроме того, подобный подход может способствовать решению фундаментальных проблем нейронных сетей – проблем извлечения правил из искусственных нейронных сетей [2, 3].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Колесниченко А.В. К разработке статистической термодинамики и техники фрактального анализа для неэкстенсивных систем на основе энтропии и различающей информации Реньи. Изд.ИПМ Препринт № 60 за 2018.
- [2] Arrieta A.B. et al. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI // Information fusion. 2020. Т. 58. С. 82-115. DOI 10.1016/j.inffus.2019.12.012
- [3] Аверкин А.Н., Ярушев С.А. Обзор исследований в области разработки методов извлечения правил из искусственных нейронных сетей // Известия РАН. Теория и системы управления. 2021. № 6. С. 106–121.
- [4] Горохов В.Л., Муравьев И.П. Когнитивная машинная графика динамических проекций и робастная сегментация многомерных данных. Методология, методики и интерфейсы: Монография. СПб.: Издательство ИНЖЭКОН. 2007. 173 с.
- [5] Горохов В.Л., Адмакин М.Ю., Степанов В.Ю., Журавлев А.А. Опыт 3-D представления когнитивных образов динамического проецирования многомерных данных // Мягкие измерения и вычисления №8 (20). 2019, с.42-50.
- [6] Gorokhov V., Vitkovskiy V. Cognitive Imaging in Visual Data-Driven Decision-Support Systems // Astronomical Data Analysis Software and Systems (ADASS) XIX, Sapporo, Japan, 4-8 October 2009.2010. P. 171–175.
- [7] Maxim Nikonov, Mikhail Chekal, Stanislav Shirokov, Andrey Baryshev, Vladimir Gorokhov. The line-of-sight analysis of spatial distribution of galaxies in the COSMOS2015 catalogue /Version October 28, 2020 submitted to Universe (2020 by the authors. Submitted to Universe for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)