

# Применение хаотизации для преодоления неопределённости в задачах моделирования

Е. Н. Бендерская

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
helen.bend@gmail.com

**Аннотация.** Предлагается концепция хаотизации систем для реализации вычислений на границе «порядок-хаос» за счет расширения пространства поиска вариантов решений и получения функционально специализированных структур. Концепция основана на природных явлениях реагирования и механизмах адаптации. Предлагаемая концепция должна обеспечить возможность получения универсальной адекватной структуры, которая помогает решать любую сложную проблему в области компьютерных наук. Одной из целей работы является привлечение внимания инженеров и разработчиков информационных и управляющих систем к возможностям использования синергетики и теории хаоса в решении задач в области информатики и системного анализа.

**Ключевые слова:** неопределенность; самоорганизация; сложные системы; нелинейная динамика; хаотизация; синхронизация

## I. ВВЕДЕНИЕ

Потребность решения задач при отсутствии полной информации об условиях ее решения (или условиях функционирования системы), т.е. потребность работы в условиях динамической (изменяющейся) среды, неполной (разрозненной), неточной (недостовверной) информации приводят к развитию моделей, в которые включена неопределенность [2, 3].

Все множество возможных неопределенностей можно свести к трем основным случаям в зависимости от того какая именно будет решаться задача:

- Модель окружающей среды известна (воздействия на объект, их состав динамика) и модель объекта известна. Неопределенности нет.
- Модель окружающей среды известна, а модель объекта неизвестна в той или иной части. Как следствие необходима структурная и параметрическая идентификация. При полной неопределенности относительно модели объекта его представляют в виде черного ящика. Неопределенность последовательно разрешается в виде проверки выдвигаемых гипотез относительно возможной структуры модели объекта за счет наблюдения за реакцией объекта на известные внешние воздействия. Неопределенность, связанную с невозможностью описать все

множество состояний объекта и вариантов внешних воздействий, часто разрешают за счет средств нечеткой логики. Для этого используют нечеткие переменные и строят меры принадлежности к тому или иному множеству возможных значений. При структурной идентификации выдвигают ряд гипотез относительно вида возможной модели объекта и после проведения параметрической идентификации для каждого варианта вычисляют меру правдоподобия. В некоторых случаях одновременно с параметрической идентификацией может осуществляться и структурная в пределах некоторого класса моделей (например, определение степени полинома совместно с его коэффициентами). Методы математической статистики и нечеткая логика являются основными составляющими различных подходов для этого случая. Для автоматизации переборной части работы при проверке различных вариантов могут быть задействованы методы оптимизации (в том, числе и генетические алгоритмы и прочее).

- Модель окружающей среды неизвестна (например, возмущающие воздействия на объект, помехи), а модель объекта известна. Большинство задач построения наблюдателей и фильтров, как раз возникает в этом случае. Кроме того, большинство подходов выработки решений (выходных сигналов), соответствующих текущей ситуации в неопределенной динамической среде, как раз разработаны для случаев, в которых неизвестна реакция окружающей среды на тот или иной выходной сигнал. Многообразие подходов также связано с использованием схемы последовательного выявления модели среды путем обучения с подкреплением (умение объекта правильно реагировать, не зная до конца модели среды, т.е. явно ее не определяя) и различных методов теории игр (дифференциальных и прочих с разной информированностью игроков – формализация задачи в виде игры). При необходимости действовать в реальном времени и при наличии неопределенности применение подходов на основе проб и ошибок с последующей оценкой очередного шага является естественной стратегией.

- Полная неопределенность. Не известны как модель объекта (черный ящик), так и модель окружающей среды.

Большинство подходов, разрешающих неопределенность исходных данных, могут быть представлены как последовательность шагов, ведущая к сужению множества, представляющего варианты возможных значений неопределенных данных. При этом разнообразие подходов связано с тем, что неопределенность может быть в разных частях задачи.

## II. ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ С ВКЛЮЧЕНИЕМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

### A. Вероятностные и рандомизированные модели

Существуют разные способы включения вероятностного (стохастического) механизма в процедуры поиска решений для расширения пространства поиска решений (пространства вариантов). Изначально включение в общий алгоритм поиска решения шага со случайным направлением было обусловлено желанием исключить ситуации, при которых поиск решения мог быть ограничен областью локального минимума. Случайный шаг переводил результат применения процедуры поиска решения в другую область линий равного уровня. Польза от случайных шагов может быть и при решении более общих задач, не только представленных как задачи оптимизации. Тогда случайная составляющая вводится в случаях, при которых имеется информация локального характера: о поведении функции на всем множестве значений ничего не известно, но есть направления поиска в локальной области, согласующиеся с линиями равного уровня данной области.

В отличие от стохастических моделей, в которые включены случайные составляющие с определенными законами распределения, отражающими свойства имеющихся помех, в рандомизированном подходе есть возможность решать задачи при произвольных помехах. Концепция обладает достоинством простоты и однозначности при разрешении неопределенности, последовательные пробы при корректной общей схеме поиска решения приводят к однозначному решению, которое, как строго математически показано в ряде работ, может быть получено с заданной точностью. И это несмотря на наличие случайных шагов в общей процедуре поиска решения. Один из примеров успешного применения рандомизированного подхода - это решение задачи кластеризации в условиях полной неопределенности.

О перспективности введения в систему элементов, обладающих неопределенностью, говорят не только уже имеющиеся успешные реализации концепции на практике, но и тот факт, что анализ природных процессов как эволюционных, так и в биологических системах принятия решений, показывает наличие случайных составляющих. Так при генетическом отборе, по имеющимся на сегодняшний день данным, явно присутствуют

вероятностный механизм выбора точек скрещивания в хромосомах при рекомбинации вероятностная мутация генов в хромосомах, необходимые для расширения числа вариантов и для развития потенциально сильных свойств отдельных составляющих системы.

### B. Нечеткие и хаотические модели

Преодоление неопределенности путем включения ее в модель системы может быть выполнено с применением нечеткой логики. В отличие от вероятностной логики, нечеткая логика («невероятностная» логика) оперирует с переменными, неопределенность которых связана со способами описания функционирования системы, т.е. скорее лингвистическая, а не статистическая, и не может быть уточнена путем многократного проведения эксперимента. Ее значения – также значения из интервала, получаются чаще всего путем экспертных оценок значений типа «большой», «маленький» и т.п. с учетом специфики решаемой задачи.

Нечеткая логика также оперирует с целым интервалом значений, а не отдельным числом, а в нечеткой логике второго типа (fuzzy logic type 2) множеством интервалов. Удобство использования и дополнительные возможности работы в условиях неопределенностей способствовали широкому распространению нечетких моделей. Можно говорить о том, что нечеткая логика занимает промежуточное положение между оперированием с четкими множествами и оперированием с хаосом.

Однако, для обеспечения возможности работы в условиях изменяющейся динамической среды одной только нечеткости модели недостаточно. Такая модель должна содержать в себе возможности, которые раскрывались бы под действием тех факторов, которые имеют место в реальных условиях работы системы, т.е. у системы должна быть возможность самоорганизовываться, что возможно в хаотических многомерных моделях [2, 4, 5, 6].

Хаотические модели являются нелинейными динамическими и обладают свойствами пространственной распределенности образования переходных режимов от одного типа состояний к другому типу состояний, и оперирование при этом осуществляется уже не с отдельными интервалами, а с целыми областями пространства. В предельном случае хаотическая логика может быть сведена к нечеткой логике, в тоже время хаотическая логика может позволить учесть и статистическую неопределенность, как и лингвистическую неопределенность, а также многовариантность за счет сложных хаотических аттракторов, т.е. является наиболее общим случаем.

Возможности хаотических систем по преодолению неопределенности путем самоорганизации и синхронизации могут быть показаны на примере решения задач кластеризации в условиях полной неопределенности [2].

## III. ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ ХАОТИЗАЦИИ

Обобщенное представление возможных подходов разрешения информационной неопределенности может

быть представлено в виде схемы (рис. 1). Эта схема отражает различие между классическим подходом и предлагаемым синергетическим подходом. Вариант классических подходов чаще всего локальных, частных, работающих в условиях различных допущений и ограничений представлен на рис. 1(а). Эти допущения, которые могут и не подтвердиться в некоторых случаях, и ограничения представлены условно в виде стрелок, ограничивающих область решений за счет разрешения неопределенности в том виде, который позволяет предложить строгие математические решения задачи (при выполнении определенных условий).

Классический подход состоит в упрощении и редукции моделей: линеаризация, применение гипотезы о наличии гауссовых шумов, фильтрация помех, понижение порядка модели, снижение размерности задачи, дискретизация по уровню и по времени и т.п. В качестве допущений может выступать, например, допущение об отсутствии корреляций или допущение о наличии того или иного вида распределения, которое обеспечивает сходимость метода и т.д., а ограничениями могут быть, например, предположение о линейности или о статичности модели, или о наличии только помех в виде белого шума и т.п.

Видно сужение условного множества возможных решений за счет конкретизации, локализации моделей. Если все условия (предположения и ограничения) верны, то это будет оптимальным решением, иначе квазиоптимальным или может оказаться вообще неверным. Здесь мы видим, что отсутствие априорной информации в задаче (неопределенность) заменяется проверкой выполнения некоторых условий и, таким образом, последовательным уточнением недостающей информации. Это, к сожалению, не всегда возможно, особенно в случае динамических систем, у которых можно наблюдать изменение не только параметров модели, но и ее структуры, и класса моделей с течением времени.

Предлагаемый подход (рис.1(б)) базируется на идее первоначального расширения пространства поиска решений за счет дополнительных размерностей – например, за счет включения временной составляющей (для задач, чаще всего рассматриваемых как статических), или за счет включения в модель дополнительной известной случайной составляющей (рандомизация), или за счет придания нелинейности системе для получения эффектов детерминированного хаоса и самоорганизации (дополнительные инварианты) [3].

Сложность применения предлагаемого подхода связана с необходимостью разработки или подбора метода интерпретации системной динамики (как, например, подбор считывающих элементов в резервуарных вычислениях) вместо выбора ограничений и проверки множества гипотез относительно моделируемого явления (классический подход). Резервуарные вычисления – другой пример использования сложной динамики для решения задачи распознавания динамических образов. Резервуарные вычисления основаны на рекуррентных нейронных сетях со случайной структурой, и они

обладают способностью генерировать сложную динамику для решения сложных задач распознавания.

Предлагаемый подход формулируется как общая концепция и детальная проработка каждой фазы для разных проблемных областей является дальнейшей задачей. Предлагаемый подход основывается не столько на хаосе, сколько на явлении самоорганизации, которая возможна преимущественно в условиях хаотической динамики. Изучением самоорганизации занимается синергетика, поэтому подход может быть назван синергетическим.

Первая фаза связана с расширением пространства решений (хаотизация, по аналогии с фазификацией в нечеткой логике), а третья фаза связана с постобработкой и формированием конкретного решения (дехаотизация, по аналогии с дефазификацией). Частным случаем предлагаемого может считаться резервуарные вычисления и хаотические нейронные сети.

Хаотизация – процедура преобразования исходной модели к нелинейной модели с целью увеличить число степеней свободы системы и обеспечить процессы самоорганизации. Дехаотизация – процедура выявления информации из нелинейной динамики и интерпретации полученной структуры (аттрактора). Универсальной процедуры хаотизации пока не получено, однако ряд рекомендаций для обеспечения процессов самоорганизации могут быть сформулированы.

Хаотизация для случая решения классической задачи кластеризации в условиях полной неопределенности относительно состава и топологии кластеров представляет собой, с одной стороны, включение в модель времени и переход к динамической системе взаимодействующих элементов, подлежащих кластеризации, а с другой стороны – каждому элементу ставится в соответствие нелинейное преобразование, которое порождает хаотическую динамику. Обнаружение синхронных элементов соответствует дехаотизации и как следствие способствует обнаружению кластеров [2].

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При сопоставлении нового подхода с уже существующими схожими по степени универсальности и сложности решаемых задач можно выявить следующие отличия нового подхода.

В отличие от резервуарных вычислений предлагается изменяемая система с точки зрения состава элементов и ее связей. При этом в резервуарных вычислениях основной сложностью и неоднозначностью обладает выбор параметров резервуара и подходящего (в том числе по сложности) считывателя, способного считать сложную динамику. Универсальные формальные методики только разрабатываются. В резервуарных вычислениях также используется нестабильная динамика для стабильного устойчивого решения задач (сходство с предлагаемым подходом), однако процессы синхронизации не учитываются и не рассматриваются, что затрудняет анализ

динамики и приводит к необходимости синтеза наблюдателей.

По сравнению с методами синергетического синтеза систем управления в предлагаемом подходе удастся избежать сложностей аналитического описания динамики объекта управления в расширенном фазовом пространстве. Это достигается за счет одновременного рассмотрения системы моделей. Общим является принцип расширения пространства состояний и затем его сужение.

Необходимо отметить схожесть с нечетким подходом – множество вариантов интерпретации и возможность однозначного выбора только при замыкании через обратную связь с окружающей средой. Об этом неоднократно писалось, что динамические свойства наилучшим образом можно использовать при образовании явной связи объект-среда.

Один из возможных вариантов реализации ранее был показан на примере одной задачи кластеризации [2]. Однако, параллельно может решаться несколько задач и тогда будут задействоваться несколько разных динамических систем с возможностью обмениваться своими динамиками.

Важно учитывать возможности хаотической динамики при разработке интеллектуальных систем в силу того, что она является основой для процессов самоорганизации и обеспечения сложности структуры, которая будет

адекватна сложности решаемой на этой структуре задачи, и кроме того, сложные биологические системы обладают неустойчивой динамикой [1, 5, 6].

Дальнейшая работа будет направлена на разработку общих подходов к интерпретации, т.е. сужению пространства состояний в контексте параллельного решения сразу нескольких задач.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Basar E. Brain function and oscillations. Springer, New York, 1998.
- [2] Benderskaya E.N. Nonlinear Dynamics as a Part of Soft Computing Systems: Novel Approach to Design of Data Mining Systems // In: Recent Advances on Soft Computing and Data Mining. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer. 2014. vol.287. pp 303-312.
- [3] Benderskaya E.N. Approaches to resolution of uncertainty: The way according to the nature. XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), IEEE Conference Publications, 2016, pp.83-85.
- [4] Wessnitzer Jan, Adamatzky Andrew, Melhuish Chris. Towards Self-Organising Structure Formations: A Decentralized Approach. // Advances in Artificial Life. Lecture Notes in Computer Science. 2001. vol. 2159. pp. 573-581.
- [5] Zak M. Quantum-inspired resonance for associative memory // Chaos, Solitons and Fractals. 2009. №41. pp. 2306–2312.
- [6] Zbilut J.P., Giuliani A. Biological uncertainty // Theory in Bioscience. 2008. №127. pp.223-227.

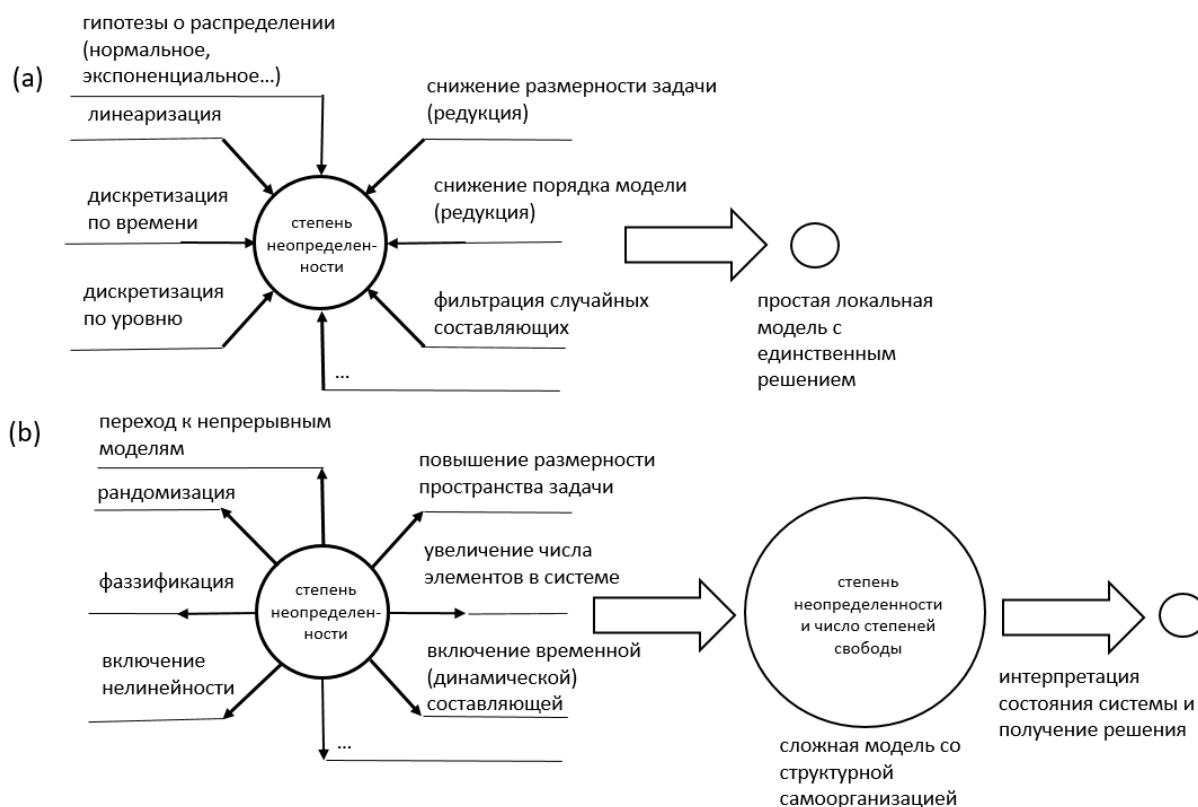


Рис. 1. Возможные подходы к преодолению неопределенности (а) – классический подход, (b) – новый подход