НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ И ПОДХОДЫ К ЕЕ ПРЕОДОЛЕНИЮ: ОБОБЩЕНИЕ И НОВЫЕ КОНЦЕПЦИИ

Е.Н. Бендерская[1], О.Н. Граничин[2]
[1]*Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет,*
Санкт-Петербург, 195251, Политехническая ул., 29,
Тел.:(812) 297-42-18, E-mail: Helen.bend@gmail.com
[2]*Санкт-Петербургский Государственный Университет,*
Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский проспект, 28.
Тел.: (812) 428-69-44, E-mail: Oleg_granichin@mail.ru

Ключевые слова: неопределенность, нечеткий, случайный, хаотический, нелинейная динамика, нетрадиционные вычисления, самоорганизация, распределенная обработка.

Представлено обобщение концепций, связанных с неопределенностью. Предлагается новый подход к преодолению неопределенности, основанный на расширение рассматриваемых моделей путем рандомизации и придания им некоторых свойств хаотических систем.

Введение

При решении некоторых задач необходимо преодолеть неопределенность в исходных данных или учесть наличие неопределенности в данных и получить решение, пригодное не только для частного случая, связанного с определенными ограничениями и допущениями на условия решения задачи.Для решения таких задач необходимо эту самую неопределенность ввести в саму систему (метод), на основе которой предполагается решать задачу. Это может быть сделано разными способами.

Желание обобщить накопленный опыт решения частных задач и получить более универсальные системы также приводит к необходимости работы с неопределенными моделями – моделями, в которых присутствует неопределенность той или иной природы – вероятностная, лингвистическая или другая [1], [2], [3], [4].

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 (недостоверной) информации приводят к развитию моделей, в которые включена неопределенность [3], [4].

Локальность решения или иначе его частность часто не позволяет решить задачу с высоким качеством. Модели с наличием внутренней неопределенности более адекватны реальным сложным задачам в динамическом мире [2], [5], [6]также как нелинейные системы являются наиболее общим случаем моделей и с их помощью можно адекватно представить большинство объектов реального мира, также как фрактальная геометрия более близка к описанию объектов реального мира по сравнению с «прямолинейной» геометрией. Надо отметить, что все три составляющие: нелинейность, фрактальность и неопределенность, а также как следствие «нелокальность» (общность), самоорганизация и синхронизация, являются частями одного общего явления – сложной системы и выступают в роли ее атрибутов [5], [6], [7]. Как неоднократно указывалось в ряде работ, настоящее время характеризуется «утратой простоты» [8], «концом определенности» [1] и переходом к действительно сложным самоорганизующимся моделям, позволяющим решать более сложные задачи в условиях полной неопределенности [9], [10], [11].

Целью работы является обобщение существующих методов преодоления неопределенности и разработка нового подхода, позволяющего использовать сложность модели для раскрытия неопределенности.

Неопределенность и практические задачи

Формализация практических задач в виде строгих математических постановок приводит к необходимости использования моделей, чаще всего с некоторыми неопределенностями, так как в реальных ситуациях редко доступна полная информация об условиях решения задачи.

Решая ту или иную задачу приходится, иметь дело с моделями, отображающими как непосредственно объект (систему или явление), так и окружение рассматриваемого объекта. Все множество возможных неопределенностей можно свести к трем основным случаям в независимости от того какая именно будет решаться задача:

1. Модель окружающей среды известна (воздействия на объект, их состав динамика) и модель объекта известна. Неопределенности нет.
2. 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).
3. 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.
4. Полная неопределенность. Не известны модель объекта (черный ящик) 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.

Учет неопределенности

Существует два основных подхода к учету неопределенности – ее преодоление за счет последовательного уточнения и локализации, ограничения модели путем введения дополнительных условий или ограничений и тем или иным способом рассмотрения частных вариантов (что будет, если значения параметров окажутся в одном интервале или что произойдет если переменная примет то или иное значение, и включение этих вариантов как составной части общего коллективного правила принятия решений). При таком подходе заведомо реализуются частные решения, и качество общего решения зависит от того, все ли варианты развития неопределенности были рассмотрены (что в общем случае не представляется возможным и учитываются наиболее вероятные). Можно охарактеризовать этот подход как много частных вариантов для получения общего в условиях неопределенности.

Второй подход заключается во включении в исходную модель системы неопределенности, которая в дальнейшем должна развиться в конкретный вариант при функционировании системы в реальной среде. При этом решение получается более общим и не является суммой частных решений.

Включение неопределенности в модель

Включение неопределенностей в модель позволяет расширить пространство вариантов решений и учесть разные возможные условия решения задачи. Это переход от локальной (точечной) модели к глобальной (пространственно-вариативной) [12]. Наиболее наглядным, но промежуточным вариантом этого перехода могут служить нечеткие модели на основе нечеткой логики, при использовании которой оперируют не с отдельным числом, а уже с целыми интервалами. Дальнейшее обобщение нечеткого подхода приводит к хаотическим моделям, оперирующими с целыми областями многомерного пространства и как следствие допускающих многовариантность. Наверное, это также объясняет огромный интерес, особенно в последнее время, к различным теориям инвариантов [13]. Таким образом, модели с неопределенностями – вероятностные и рандомизированные, нечеткие, хаотические модели.

Вероятностные и рандомизированные модели. Вероятностные модели на основе вероятностной логики подразумевают включение в качестве составляющих модели системы таких элементов, значения которых заданы не только в виде 1 и 0, но ив виде их промежуточных значений, полученных путем статистического усреднения. Это вариант преодоления неопределенности, которая носит вероятностный характер и подразумевает возможность многократного воспроизведения экспериментов для получения статистически значимых значений, при этом также предполагается, что все требования по возможности статистической обработки результатов экспериментов выполнены. Необходимо отметить, что несмотря на большое распространение этого подхода в виду его относительной простоты, он не может покрыть многие случаи неопределенностей, не носящие статистической природы, как например, лингвистическая неопределенность, которая, как известно, характерна для выражения неточных описаний типа «немного», «очень много» и т.п. и хорошо преодолевается с помощью использования аппарата нечеткой логики.

Также 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 [14]. 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.

Концепция рандомизированного подхода – еще один способ преодоления неопределенности, в ситуациях, при которых нет априорной информации относительно предпочтительности того или иного направления в поиске решения (или значения параметра системы) и тогда принимается случайное решение, которое в последствии будет уточнено при формировании общего решения [15].

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 [16]. 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 [16], [17]. И это несмотря на наличие случайных шагов в общей процедуре поиска решения. Рандомизированный подход «заставляет» раскрываться неопределенность определенным образом, так как в систему вводятся случайные составляющие с заранее заданными характеристиками, в отличие от стохастических моделей, в

которых характеристики случайности еще надо определить. Один из примеров успешного применения рандомизированого подхода – это решение задачи кластеризации в условиях полной неопределенности [18], [19].

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 [1], [2], [20], [21]. Так при генетическом отборе, по имеющимся на сегодняшний день данным, явно присутствуют вероятностный механизм выбора точек скрещивания в хромосомах при рекомбинациии вероятностная мутация генов в хромосомах, необходимые для расширения числа вариантов и для развития потенциально сильных свойств отдельных составляющих системы. В биологических нейронных сетях также можно наблюдать вероятностные принципы функционирования, например, имеются стохастические нейроны и синапсический шум, обеспечивающие высокую готовность системы к реагированию на входные воздействия.

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 [12]. 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 [4], [5], [6], [7], [22].

Хаотические модели являются нелинейными динамическими и обладают свойствами пространственной распределенностии 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 [23], [24].

Неопределенность и новые концепции работы с ней

Обобщенное представление возможных подходов разрешения информационной неопределенности может быть представлено в виде схемы (рисунок 1). Вариант классических подходов чаще всего локальных, частных, работающих в условиях различных допущений и ограничений представлен на рисунке 1а. 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). В качестве допущений может выступать, например, допущение об отсутствие 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.

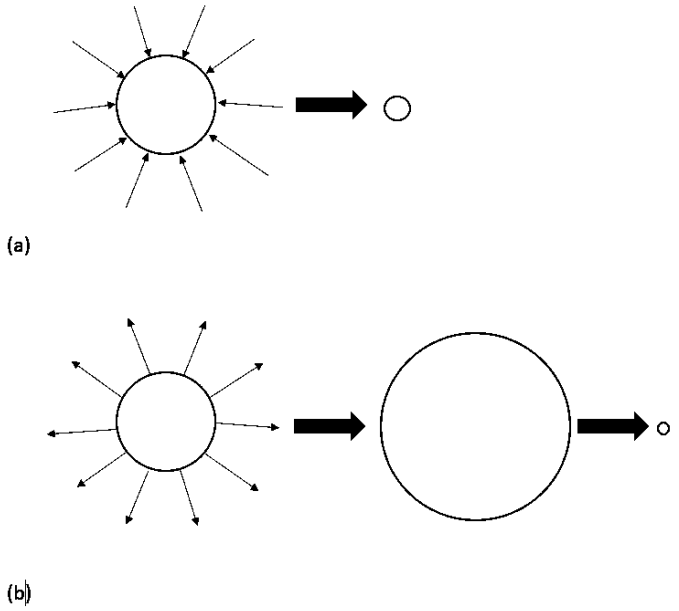

Рис.1. Возможные подходы к преодолению неопределенности
(a) – классический подход, (b) – новый подход

Налицо сужение условного множества возможных решений за счет конкретизации, локализации (преодоления неопределенности) моделей. Если все условия (предположения и ограничения) верны, то это будет оптимальным решением, иначе квазиоптимальным (при робастности конкретного примененного метода) 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 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).

Надо отметить, что идея рассмотрения множества вариантов не нова (коллективы решающих правил, также и различные методы введения дополнительной искусственной переменной, и т.п.). Однако в данном случае отличительной черной является не только одновременное сосуществование множества вариантов как, например, в генетических алгоритмах, предполагающих последовательный перебор различных комбинаций (во многом искусственных), но и их конкуренция взаимодействие и образование новых вариантов. Более важно придание дополнительных степеней свободы для осуществления самоорганизации, формирования естественной структуры, которая соответствует как динамике внутренних процессов объекта, так и входным воздействиям внешней окружающей среды. В этом случае мы получаем единую систему объект – среда. Дополнительные степени свободы, вводимые в систему, в предлагаемом подходе представлены на рис.1б условно стрелочками. Платой за использование процессов самоорганизации является достаточно сложный процесс интерпретации состояний полученной системы.

Поэтому, использовать данный метод имеет смысл в случае, когда невозможно использовать уже хорошо зарекомендовавших себя классических методов преодоления неопределенностей и

при наличии действительно системы с большим числом элементов и множественными связями, в которой можно обеспечить процессы самоорганизации.

Пример расширения пространства решений за счет включения дополнительной компоненты – времени, и дальнейшую интерпретацию решения в задаче кластеризации можно найти в [23], [24].

В отличие от прямых методов разрешения неопределенности (относительно числа и состава кластеров) в данной работе предлагается первоначальное расширение поля неопределенности, использование процессов самоорганизации и формирование структур, которые затем считываются и происходит уже сужение пространства решений до конкретного варианта.

Заключение

Отличительная черта природных явлений как в живой, так и в неживой природе – гибкая реакция и высокая чувствительность к изменениям во внешней среде при робастном функционировании системы в целом, а главное – умение приспосабливаться к любым возникающим ситуациям за счет неисчерпаемой изменяемости.

Один из перспективных путей преодоления неопределенности – расширение пространства возможных вариантов решений, а не их сокращение за счет локализации решения в условиях отсутствия априорной информации об условиях решения задачи. Конкретизациярешениябезвзаимодействиясистемысокружающейсредойтолькозасчетееограниченияможенетприводитькнеточным, или неробастным, а иногда и к заведомо неверным решениям. Поэтому предлагается подход с первоначальным расширением неопределенности за счет введения рандомизированных компонент и за счет включения нелинейности в систему, для того чтобы обеспечить процессы самоорганизации по аналогии с тем, как это может происходить в природе.Конечно, в этом случае приходится иметь дело с более сложными системами, но эффективно учитывающими все особенности среды, в которой им приходится функционировать.При этом конкретизация условий функционирования естественным образом отражается в динамике нелинейной динамической системы расшифровать которую, конечно, в некоторых случаях достаточно сложно. Ограничения предлагаемого подхода –имеет смысл применять для динамических сложных систем с большим числом элементов. Эти системы, как правило, аналитически неразрешимы в общем случае, строгому математическому анализу поддаются только частные варианты (правда, для получения конкретного частного варианта необходима априорная информация, позволяющая свести общую систему к частному варианту, но она не всегда доступна). Подход предполагает рассмотрение как единой системы и модели среды и модели объекта.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 13–07–00250–а).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пригожин И.** Конец определенности. Ижевск: РХД. 2001. 216 с.
2. **Zbilut J.P., Giuliani A.** Biological uncertainty // Theory in Bioscience. 2008. №127. pp.223–227.
3. **Wolfram Stephen.** A New Kind of Science. Champaign. Illinois. Wolfram Media. Inc. 2002. 1197 p.
4. **Benderskaya E.N.** Nonlinear Trends in Modern Artificial Intelligence: A New Perspective // Beyond AI: Interdisciplinary Aspects of Artificial Intelligence. Topics in Intelligent Engineering and Informatics. Springer. 2013. vol. 4. pp. 113–124.
5. **Хакен Г.** Синергетика. М.: Мир. 1980. 406 с.
6. **Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю.** Синхронизация: Фундаментальное нелинейное явление. М: Техносфера. 2003. 496 с.
7. **Zak M.** Quantum-inspired resonance for associative memory // Chaos, Solitons and Fractals. 2009. №41. pp. 2306–2312.
8. **Моисеев Н.Н**. Расставание с простотой. М.: Аграф, 1998. 480 с.
9. **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.
10. **Галушкин А.И.** Нейронные сети: основы теории. Горячая линия–Телеком. 2010. 496 с.
11. **Benderskaya E.N.** Nonlinear Dynamics as a Part of Soft Computing Systems: Novel Approach to Design of Data Mining Systems // Recent Advances on Soft Computing and Data Mining. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer. 2014. vol. 287. pp. 303–312.
12. **Valente de Oliveira J., Pedrycz W.** Advances in Fuzzy Clustering and its Applications. Wiley. 2007. 454 p.
13. **Колесников А. А.** Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат. 1994. 344 с.
14. **Blum T.** Multidimensional stochastic approximation methods // Ann. Math. Stat. 1954. №4. pp. 737–744.

15. **Amelin K., Granichin O.** Randomized controls for linear plants and confidence regions for parameters under external arbitrary noise // Proc. of the 2012 American Control Conference. Montréal. Canada. June 27–June 29. 2012. pp. 851–856.
16. **Granichin O.N.**The nonasymptotic confidence set for parameters of a linear control object under an arbitrary external disturbance // Automation and Remote Control. 2012. vol.73. Issue 1. pp. 20–30.
17. **Vakhitov A.T, Granichin O.N., Sysoev S.S.** A randomized stochastic optimization algorithm: Its estimation accuracy // Automation and Remote Control. 2006. vol. 67. Issue 4. pp. 589–597.
18. **Avros R., Granichin O., Shalymov D., Volkovich Z., Weber G.–W.** Randomized algorithm of finding the true number of clusters based on Chebychev polynomial approximation // Data Mining: Foundations and Intelligent Paradigms. Intelligent Systems Reference Library. ISRL. Springer. 2012. vol. 23. pp. 131–155.
19. **Granichin O., Volkovich V., Toledano-Kitai D.** Randomized Algorithms in Automatic Control and Data Mining. Springer-Verlag: Heidelberg. 2014. 275p.
20. **Potapov A.V., Ali M.K.** Nonlinear dynamics and chaos in information processing neural networks // Differential Equations and Dynamical Systems. 2001. №9(3–4). pp. 259–319.
21. **Kravtsov Yu.A.** Randomness, determinateness and predictability //Sov. Phys. Uspekhi. 1989. №32(5). pp.424–449.
22. **Malinetskii G.G.** Synergetics, Predictability and Deterministic Chaos // Limits of Predictability. Springer Series in Synergetics. 1993. vol. 60. pp. 75–141.
23. **Benderskaya E.N., Zhukova S.V.** Clustering by Chaotic Neural Networks with Mean Field Calculated Via Delaunay Triangulation // Corchado E., Abraham A., Pedrycz W. (eds.) HAIS 2008. LNCS (LNAI). Springer. Heidelberg.2008. vol. 5271. pp. 408–416.
24. **Benderskaya E.N., Zhukova S.V.** Large-Dimension Image Clustering by Means of Fragmentary Synchronization in Chaotic Systems // Pattern Recognition and Image Analysis. vol. 19. №2. Springer. 2009. pp. 306 – 316.