УДК 681.5.015: 681.518.25: 519.246

ЛАБИРИНТ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ПО ДАННЫМ ЕГО НОРМАЛЬНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

В.М. Трояновский
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
Россия, 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д.1
E-mail: troy40@mail.ru

О.А. Сердюк
АО РОСЭКСИМБАНК, Группа Российского экспортного центра
Россия, 123610, Москва, Краснопресненская наб., 12
E-mail: serdyukolga@yandex.ru

А.А. Запевалина
ООО «Альпина Пласт»
Россия, 141600, Клин, Ленинградское ш., 103
E-mail: nairy253@mail.ru

Ключевые слова: идентификация, статистические оценки, работа в реальном времени, запасенная энергия, усреднение по множеству и вдоль реализации, лабиринтный подход.

Аннотация: Идентификация характеристик динамических объектов – одна из центральных проблем построения систем управления. При описании и анализе реальных систем, как правило, возникает дополнительная необходимость введения структурных элементов, свойственных лабиринту, и соответствующих кибернетических и математических моделей. Системно-связанные ограничения оказывают влияние на выбор математического аппарата и на результат процесса идентификации. Возникает сложное, многосвязное переплетение ситуаций, напоминающее лабиринт. Применение лабиринтного подхода позволяет предвидеть и анализировать развилки, тупики, петли, вынужденные остановки, возвраты и повторения при идентификации динамического объекта по данным его нормального функционирования.

1. Введение

Идентификации является одной из центральных проблем, связанных с возможностью расширения знаний о динамике систем и повышения качества их функционирования. В предисловии к книге П. Эйхкоффа [1] Н.С. Райбман отмечает важность данного направления теории управления и связывает его возникновение с существенным различием реального объекта и модели, принятой при его проектировании.

За свою историю развития и совершенствования методы идентификации прошли ряд важных этапов с переходом от активного эксперимента к использованию данных нормального функционирования действующих производств. Как указывает Я.З. Цыпкин в монографии [2]: «существует огромное число методов идентификации, отличающихся не только типами идентифицируемых объектов, но и прогнозирующими или настраиваемыми моделями, отчасти критериями качества идентификации и особенно алгоритмами идентификации. Какая-либо определенная единая классификация постановок задач идентификации и методов их решения к настоящему времени по существу отсутствует».

От работ по идентификации, начатых Н.С. Райбманом и зарубежными учеными полвека назад [3], разработки Л. Льюнгом «теории для пользователей» [4] и др. многочисленных публикаций, в ИПУ РАН перешли к проведению регулярных международных конференций SICPRO по идентификации [5], привлечению идей использования ассоциаций и систем, основанных на знаниях [6,7], организации секций по идентификации на конференциях, организуемых IEEE и IFAC. Интерес к идентификации лишь расширяется, что очевидно свидетельствует о многогранности проблемы, при решении которой возникает сложное, многосвязное переплетение ситуаций, напоминающее лабиринт.

Именно с позиций «лабиринтного подхода» [8] ниже анализируется постановка задачи идентификации параметров динамического объекта по данным его нормального функционирования и некоторые аспекты ее решения.

2. О лабиринтном подходе

Проводя аналогию решения технической задачи с движением в лабиринте (от входа к выходу), нетрудно заметить, что учет возможных коллизий (наличие развилок, тупиков, петель, вынужденных остановок, возвратов и повторений) существенно обогащает обычно используемый системный анализ на начальных этапах решения задачи. С математической точки зрения, лабиринт со времен Л. Эйлера представляют в виде графа [9], где ребра – это переходы, а вершины – входы, выходы, перекрестки и тупики.

В контексте процесса идентификации, представляет интерес ориентированный взвешенный граф

$$G(In, Out, V, U, T, Pt, Pv, O, Vz, R, S, P),$$

где In – вход, Out – выход, V – множество всех вершин, U – множество всех дуг, T – множество тупиков, Pt – множество петель, Pv – множество повторений, O – множество вынужденных остановок, Vz – множество возвратов, R – множество развилок, S – множество всех сумматоров и P – множество всех объединений, причем, $T \subseteq (V \times U)$, $Pt \subseteq (V \times U)$, $Pv \subseteq (V \times U)$, $O \subseteq (V \times U)$, $Vz \subseteq (V \times U)$, $R \subseteq (V \times U)$, $S \subseteq (V \times U)$, $P \subseteq (V \times U)$.

В вершинах графа происходит изменение параметров, характеризующих этапы решения задачи (они могут иметь как детерминированный, так и вероятностный характер). На дугах осуществляется контроль перехода между вершинами и оценка расходования ресурсов. Учет и анализ ограничений позволяет определить (если и не оптимальный, то) рациональный путь в лабиринте и увеличить надежность и количественную обоснованность достигаемого результата.

3. Лабиринтные ситуации при идентификации динамического объекта

Сложность задачи идентификации определяется уникальном сочетанием условий, которые необходимо системно-связанно учитывать при ее решении:

- работа в реальном времени;

- стохастичность воздействий и малая изученность объектов;
- принципиально ограниченная длина доступных реализаций и использование данных от единственного объекта;
- динамическое преобразование сигналов в объекте исследования;
- дискретно-непрерывные преобразования сигналов.

Авторы данной работы решали задачи идентификации и публиковали результаты, последовательно расширяя и уточняя получаемые оценки точности с учетом указанных ограничений – от сообщения на VII Всесоюзном совещании (Минск, 1977), выступлений на конференциях, организуемых ИПУ, IEEE и IFAC – до монографии [10].

Ниже акцентируем внимание на возникновении лабиринтных ситуаций, не поддававшихся другим исследователям.

Работа в реальном времени и «запасенная энергия». Реакция физически реализуемых объектов и операторов не может наступить в реальном времени раньше, чем было приложено входное воздействие. К сожалению, как отмечают В.С. Пугачев [11], Д. Миддлтон [12], Я.З. Цыпкин и др., многие изящные математические построения при расчете систем обработки информации и управления приводят к физически нереализуемым операторам (тупик!).

Применению операционного исчисления и гармонического анализа – свои препятствия: не выполняются фундаментальные гипотезы, на которых эти методы основаны (стохастичность сигналов, граничные условия). Возвращение к математическому аппарату пространства состояний наталкивается на отсутствие данных о начальном состоянии объекта к началу наблюдения за ним («запасенная энергия») – и невозможности построения адекватной модели развития процесса [1] (опять – тупик?).

Вопрос о «запасенной энергии» многократно обсуждался (И.И. Перельман [13], П. Эйкхофф [1], Л. Льюнг [5],), или обходился и замалчивался (Справочник по теории автоматического управления, [14]), но не находил адекватного разрешения до анализа, изложенного нами в [15,16].

Парадокс усреднения по времени и по множеству. Стохастичность сигналов в режиме нормального функционирования объектов требует использования при идентификации статистических методов. Статистика изначально рассматривает случайные события, вероятности и т.п. на базе теории множеств. При этом мощность такого гипотетического множества (обычно или по умолчанию) полагается бесконечной.

На практике вместо ансамбля независимых реализаций приходится иметь дело с единственной реализацией и ограниченной выборкой данных, которые могут быть еще и коррелированными. На значимость возникающих при этом различий неоднократно указывал акад. В.С. Пугачев, и при выборе путей решения задачи идентификации можно «зримо» представить опасный парадоксальный «тупик» уже при решении задачи идентификации безинерционного объекта в условиях независимости сигнала и помехи.

Как показано в [10, 15], наилучшая оценка коэффициента усиления безынерционного объекта, полученная с использованием лишь характеристик множества, всегда точно равна истинному коэффициенту усиления объекта независимо от уровня помехи (!):

$$\hat{k} = \frac{K_{xz}(0)}{\sigma_x^2} = \frac{M\{x(t)\big(kx(t)+n(t)\big)\}}{\sigma_x^2} = \frac{k\sigma_x^2 + M\{x(t)n(t)\}}{\sigma_x^2} = k.$$

Формально такой результат возникает из-за того, что математическое ожидание произведения независимых сигналов равно нулю. Физически это можно интерпретировать как предельный случай усреднения бесконечного множества частных произведений отсчетов сигнала и (независимой) помехи.

Результаты (и корректное решение) доложены нами на конференции IEEE [15] и опубликованы в журнале ISIC (входит в топ-20% по ImpactFactor, Web of Science).

Вынужденные остановки, возвраты, вероятностные оценки качества. Плохая работа алгоритмов ранних работ по идентификации, как показано в [10, 15], связано не только со слепым следованием «уравнению типа Винера-Хопфа». Нам пришлось в самом начале сделать вынужденную остановку для тщательного выбора математического аппарата и преодоления эффекта «запасенной энергии», а уже после решения задачи возвращаться к количественной оценке погрешности идентификации вследствие игнорирования эффекта «запасенной энергии» [16].

Но оставались претензии первых (и последующих) исследователей относительно плохой сходимости оценки ковариационной функции к ее истинному значению и привлечению методов регуляризации. Уже после получения количественных вероятностных оценок точности идентификации динамического объекта по данным его нормального функционирования с учетом указанных выше системно-связанных ограничений пришлось возвращаться к этим вопросам.

Как показано в [10, 15], обратная ковариационная матрица для сигнала с экспоненциальной ковариационной функцией, имеет 3-кодиагональный вид, что обеспечивает простейшему алгоритму сглаживания (оценки весовой функции) эффективность лучше, чем при регуляризации. Удалось показать также [17], что дополнительная погрешность идентификации из-за статистических флуктуаций корреляционной функции входного сигнала становится пренебрежимо малой при числе отсчетов, меньших сотни.

Частные оценки и обращение матрицы. Вплоть до недавнего времени все еще поднимался вопрос об обратимости частной корреляционной матрицы входного сигнала. Для разрешения этой проблемы рассмотрим [18] линейное преобразование сигнала, проходящего через динамический объект (рис. 1).

$$x(t) \rightarrow \boxed{\;h(t)\;} \rightarrow y(t)$$

Рис. 1. Схема линейного преобразования сигнала.

Дискретное уравнение свертки имеет вид:

(1) $$y[i] = \sum_{j=0}^{L+1} h[j]x[i-j]\,, i = 1,2,\dots,m,$$

где $x[i]$ и $y[i]$ - отсчеты входного и выходного сигналов, m – число отсчетов в реализации, $h[i]$ - дискретная весовая функция преобразователя сигналов длиной L отсчетов.

В векторной форме соотношение (1) запишется как

(2) $$\vec{y} = X'\vec{h},$$

где векторы-столбцы $\vec{y}$, $\vec{h}$ имеют размерности m и $(L+1)$ соответственно, а матрица наблюдения входного сигнала X' имеет размерность $m \times (L+1)$.

На основании (2) определим сумму квадратов компонент вектора $\vec{y}$ через скалярное произведение $S = \vec{y}'\vec{y} = \vec{h}XX'\vec{h} = \vec{h}'A_{xx}\vec{h}$. Здесь A_{xx} - частная корреляционная матрица входного сигнала. Нетрудно видеть, что $S = 0$ только в случае, когда все компоненты вектора $\vec{h}$ равны нулю, в ином случае $S > 0$, т.к. является суммой квадратов для отсчетов выходного сигнала. Именно это и доказывает положительную определенность частной корреляционной матрицы входного сигнала.

Неопределенность длины весовой функции. На основе возврата к результатам, полученных ранее, и их развития нами разработан алгоритмический метод идентификации в условиях неопределенности относительно длины весовой функции объекта. Он описан в [18].

4. Заключение

Приведенный анализ показывает, что при выборе и использовании математических методов и алгоритмов решения задач идентификации динамического объекта по данным его нормального функционирования лабиринтный подход позволяет предвидеть возможное наличие развилок, тупиков, петель, вынужденных остановок, возвратов и повторений, что существенно обогащает обычно используемый системный анализ на начальных этапах решения задачи.

Список литературы

1. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 680 с.
2. Цыпкин Я. 3. Информационная теория идентификации. М.: Наука, Физматлит, 1995. 336 с.
3. Райбман Н.С., Чадеев В.М. Области применения различных методов идентификации // Автоматика и телемеханика. 1969. № 6.
4. Proceedings of the I-VII International Conference "System Identification and Control Problems" (SICPRO`2000 - SICPRO `08). Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, 2000-2008.
5. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина. М.: Наука, ГРФМЛ, 1991. 432 с.
6. Bakhtadze N.N., Lototsky V.A. The identification technique with associative search based learning // Proceedings of the IX International Conference "System Identification and Control Problems" SICPRO '12. Moscow, January 30 – February 2, 2012. M.: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sviences, 2012. P. 16-27.
7. Przemysław Różewski, Dmitry Novikov, Natalia Bakhtadze, Oleg Zaikin (Editors). New Frontiers in Information and Production Systems Modelling and Analysis. Springer International Publishing, 2016. 268 p.
8. Запевалина А.А., Трояновский В.М. Моделирование процесса обучения с учетом лабиринтной структуры знаний // Современные информационные технологии и ИТ-образование / Сборник научных трудов IX Международной научно-практической конференции / Под ред. В.А. Сухомлина. М.: МГУ, 2014. С. 24-30.
9. Лабиринты. Графы и их применение. http://www.intuit.ru/studies/courses/58/58/lecture/ 1714?page=3
10. Трояновский В.М. Программная инженерия информационно-управляющих систем в свете прикладной теории случайных процессов: учеб. пособие. М. : ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2018. 325 с.
11. Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. М.: Физматгиз, 1962. 884 с.
12. Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи. М.: Советское радио, 1962.
13. Перельман И.И. Асимптотические свойства погрешности оценки импульсной характеристики // Автоматика и телемеханика. 1968. № 1. С. 189-199.
14. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. Красовского А.А. / М.: Наука, ГРФМЛ. 1987. 712 с.
15. Serdyuk O. A., Troyanovskyi V.M. The ideal representations, rocks and realities of statistical methods' identification // 2009 IEEE International Conference on Control Applications. P. 1472-1476.
16. Трояновский В.М., Сердюк О.А. Оценка погрешности идентификации вследствие игнорирования эффекта «запасенной энергии» // Труды X Международной конференции «Идентификации систем и задачи управления» SICPRO '15. Москва, 26-29 января 2015 г. М.: Институт проблем управлении им. В.А. Трапезникова РАН, 2015. С. 239-259.
17. Трояновский В.М., Сердюк О.А. Дополнительная погрешность идентификации из-за статистических флуктуаций корреляционной функции входного сигнала / Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-20 июня 2014 г. М: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 3255-3268.
18. Трояновский В.М., Сердюк О.А. Алгоритмический метод идентификации в условиях неопределенности относительно длины весовой функции объекта // Труды IX Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO '12. Москва. 30 января - 2 февраля 2012 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. С. 130-149.