

К оценке состояния сложных объектов с помощью инвариантов

А.Д. Хомоненко¹
khomon@mail.ru

Е.Л. Яковлев²
evgen-1932@yandex.ru

1–Петербургский государственный университет путей сообщения (Санкт-Петербург)

2–Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (Санкт-Петербург)

Аннотация

В статье рассматривается способ описания и представления множества технических состояний, в которых может находиться исследуемый объект, с помощью инвариантов моментов. Особенностью является возможность представления каждого конкретного технического состояния сложного объекта не множеством диагностических признаков, а с помощью небольшого набора значений инвариантов моментов, которые вычисляются на основе портрета технического состояния этого объекта.

Ключевые слова: техническое состояние, диагностические признаки, инварианты моментов.

1 Введение

Выполняя различные задачи по предназначению, технически сложные объекты различного назначения, в том числе ракетно-космические комплексы, должны отвечать многочисленным требованиям по обеспечению работоспособности в условиях воздействия внешних факторов. В современных условиях сложные технические системы (СТС) постоянно развиваются и усложняются, что требует непрерывного мониторинга и контроля параметров их состояния для решения задачи нормального функционирования, и в свою очередь, создания систем информации о техническом состоянии и надежности. В задачи таких систем входит получение достоверной информации о параметрах функционирования исследуемого объекта в реальном масштабе времени и анализ этой информации для определения текущего состояния объекта с целью принятия решения по управляющим воздействиям. Параметры системы информации о техническом состоянии (ТС) и надежности таких сложных систем, как космические комплексы и входящие в их состав изделия устанавливаются в [1]. Таким образом, эффективный анализ ТС позволяет значительно повысить оперативность и достоверность контроля объекта управления, определение причин возникновения отказов и неисправностей, в составляющих его системах и агрегатах, осуществлять своевременные управленческие действия по их парированию и недопущению развития аварийных ситуаций и катастроф, приводящих к существенному снижению целевых возможностей объектов космического комплекса.

Задача контроля и мониторинга технического состояния объектов относится к задачам общей теории распознавания образов текущего состояния объекта [2]. Решения этой задачи в технической диагностике основаны на диагностических моделях, устанавливающих связь между состоянием технической системы и его отображением в пространстве диагностических признаков.

В общем случае модель объекта анализа можно представить в виде упорядоченного множества [3]:

Copyright © by the paper's authors. Copying permitted for private and academic purposes.

In: G.A. Timofeeva, A.V. Martynenko (eds.): Proceedings of 3rd Russian Conference "Mathematical Modeling and Information Technologies" (MMIT 2016), Yekaterinburg, Russia, 16-Nov-2016, published at <http://ceur-ws.org>

$$\sum = \langle T, U, Y, X, q \rangle, \quad (1)$$

где T – множество моментов времени t , в которые наблюдается объект; U, Y – множество входных U и выходных Y сигналов соответственно; X – множество состояний объекта, характеризуемое в каждый момент времени $t \in T$ набором переменных x_k ; $k = \overline{1, s}$; q – оператор выходов, описывающий зависимость формирования выходного сигнала от тестовых и рабочих воздействий, а также внутренних возмущений, например, отказов составных элементов объекта.

При анализе ТС сложного объекта первоначально решается задача наблюдения, т.е. отыскания такого отображения:

$$q : T \times U \times X \rightarrow Y, \quad (2)$$

которое при фиксированных значениях $t \in T$ и $x(t) \in X$ обеспечивает выполнение условий полной наблюдаемости этого объекта. Полная наблюдаемость достигается соответствующим выбором контрольных точек, в которых должен проводиться съем выходных сигналов – выбор диагностических параметров. Эта задача решается на этапе разработки объекта, с ее помощью определяются типы датчиков и места их установки для получения достаточной информации при контроле и диагностировании.

На втором этапе решается задача отнесения наблюдаемого состояния объекта к одному из видов его ТС, называемая задачей классификации. Ее решение заключается в отыскании отображения:

$$\eta : Y \rightarrow S, \quad (3)$$

где S – множество видов ТС объекта; η – оператор, описывающий зависимость между состоянием технической системы и его отображением в пространстве диагностических признаков.

Для определения технического состояния объекта в пространстве параметров его модели производится сравнение значений параметров с их расчетными значениями, установленными для каждого из заданных видов ТС. Пространство диагностических признаков можно представить, как массив $Y_{[n, \pi]}$ из n измерений по π телеметрируемым параметрам. На практике, в СТС, например, в ракетно-космической технике производятся измерения нескольких тысяч телеметрических параметров. С учетом различной частоты опроса измерительных датчиков, и длительности по времени общее количество получаемых значений результатов измерений может значительно превышать миллион [4].

При создании интеллектуальных систем контроля и диагностирования СТС в современных работах используются алгоритмы, осуществляющие выбор диагностических признаков с учетом их ценности и последующее снижение размерности пространства с помощью метода главных компонент [5, 6]. На конечном этапе осуществляется проекция многомерных данных на произвольно заданную плоскость в многомерном конфигурационном (фазовом) пространстве [4]. Этот способ, на наш взгляд, подходит для визуализации текущей обстановки, но не может быть использован в системах поддержки принятия решений (СППР). Реализация обработки таких проекций внутри СППР является трудоемким процессом.

2 Описание технического состояния на основе инвариантов моментов

В настоящей статье предлагается описание и представление множества технических состояний, в которых может находиться исследуемый объект, с помощью двумерных инвариантов моментов.

Введем обозначения согласно [3]:

$S = \{S_i \mid i = \overline{1, m}\}$, – множество технических состояний, в одном из которых находится анализируемый объект;

$Y = \{Y_j \mid j = \overline{1, n}\}$, – множество диагностических признаков, на котором все состояния $S_i \in S$ попарно различимы.

Согласно (3), состоянию S_i соответствует свой определенный вектор Y_j , характеризующийся значениями диагностических признаков. Определено множество T моментов времени t , в которых наблюдается СТС. В любой момент времени $t \in T$ вектор Y_j , можно представить как вектор-функцию, компонентами которой являются сигналы измерительных датчиков, установленных в различных контрольных точках

проверяемой системы. Для снижения размерности при решении задачи распознавания состояний предлагается использовать аппарат представления и описания изображения, основанный на расчетах инвариантов моментов [7]. Для этого каждому $Y_j(t)$ целесообразно сопоставить портрет технического состояния в виде значений моментов, рассчитанных для дискретной матрицы размером $\Pi \times T$, где по оси x располагаются номера измеряемых параметров π , по оси y время t . Значениями матрицы являются значения диагностического признака в соответствующий момент времени. Такой подход позволяет каждому определенному техническому состоянию сопоставить портрет технического состояния, дающий возможность интерпретации технического состояния исследуемого объекта.

Двумерный момент порядка $(p + q)$ матрицы $f(x, y)$ определяется по формуле:

$$m_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x, y), \quad (4)$$

при $p, q = 0, 1, 2, \dots$, где суммирование производится по всем значениям координат x и y данной матрицы.

Центральный момент цифрового изображения $f(x, y)$ задается выражением:

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y), \quad (5)$$

где $\bar{x} = m_{10}/m_{00}$, $\bar{y} = m_{01}/m_{00}$.

Нормированный центральный момент порядка $(p + q)$ рассчитывается по формуле:

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{pq}^\gamma}, \quad (6)$$

где $\gamma = (p + q)/2 + 1$.

В процессе анализа изображения рассчитываются следующие семь инвариантов моментов для фрагментов изображения, которые инвариантны относительно переносов, осевой симметрии, поворотов, а также растяжений и сжатий [7]:

$$\phi_1 = \eta_{20} + \eta_{02}. \quad (7)$$

$$\phi_2 = (\eta_{20} + \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2. \quad (8)$$

$$\phi_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2. \quad (9)$$

$$\phi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2. \quad (10)$$

$$\eta_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})((\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2) + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})(3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2). \quad (11)$$

$$\eta_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})((\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2) + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}). \quad (12)$$

$$\eta_7 = (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})((\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2) - (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03})(3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2). \quad (13)$$

При использовании инвариантов моментов обычно используют модули прологарифмированных инвариантов вместо значений самих инвариантов. Это делается для сужения динамического диапазона величин, а модули применяются, чтобы уйти от комплексных чисел, которые возникают при логарифмировании отрицательных значений [8]. Инварианты моментов с успехом используются для описания и распознавания изображений.

Использование всех семи инвариантных моментов, вычисленных по изображению, является необязательным. Можно ограничиться меньшим количеством инвариантов моментов, в зависимости от размерности и точности решаемой задачи определения технического состояния, глубины анализа исследуемой системы.

Задача распознавания образов, при определении технического состояния СТС, предполагает решение двух относительно самостоятельных задач:

1. Классификация (кластеризация) некоторой группы объектов (процессов, ситуаций) на основе заданных требований (заданных критериев).

2. Распознавание (отнесение одному из классов) вновь предъявляемого объекта.

На первом этапе необходимо провести подготовку исходных данных и формирование множества технических состояний и диагностических признаков. На этом этапе происходит выбор анализируемых систем и режимов работы СТС, телеметрируемых параметров, статистический анализ результатов функционирования (использования) аналогичных СТС. Затем с учетом анализа работы технических систем исследуемого объекта, статистических данных при функционировании в штатных и нештатных ситуациях, конструкторской документации, мнений экспертов и определить множество всевозможных технических состояний. Причем, это могут быть как состояния, характеризующиеся различными отказами отдельных функциональных систем СТС, так и состояния соответствующие различным режимам работы исследуемой системы. Диагностические признаки могут быть выражены в дискретной и в непрерывной формах представления. Таким образом, необходимо определить соответствие каждому S_i вектор Y_j и рассчитать на его основе инвариантные моменты, которые и будут портретом технического состояния исследуемой системы, ее модельными значениями.

Второй этап предполагает сравнение модельных (эталонных) значений инвариантов моментов с аналогичными инвариантами, рассчитанными для конкретных технических состояний, и, если значения отклоняются от значения эталона не более чем на допустимую величину, считается, что текущее техническое состояние определено.

3 Заключение

В итоге отметим, что оценка состояния сложных объектов с помощью инвариантов позволяет заметно упростить построение системы поддержки принятия решений для получения информации о техническом состоянии СТС в режиме реального времени, облегчить процесс принятия решения экспертом при контроле сложных технических объектов. Такой способ позволит упростить вывод по определению состоянию объекта, например, с помощью продукционных правил, так как приводит к существенному сокращению их количества.

Дальнейшие исследования целесообразно продолжить в направлении выработки рекомендаций по определению количества инвариантов моментов, используемых для представления информации о техническом состоянии исследуемого объекта. Обосновать раздельное или совместное использование дискретных и непрерывных форм представления диагностических признаков. Разработать и обосновать структуру системы поддержки принятия решений, способной получать и обрабатывать информацию о техническом состоянии в режиме реального времени, обеспечивать процесс принятия решения экспертом при контроле и диагностировании сложных технических объектов.

Список литературы

- [1] GOST PO 1410-002-2010. *Cosmic complexes. Information system on the technical condition and reliability of complexes and their constituent products*. Moscow, 2010 (in Russian). = ГОСТ PO 1410-002-2010. *Комплексы космические. Система информации о техническом состоянии и надежности комплексов и входящих в их состав изделий*. Москва, 2010.
- [2] A. K. Dmitriev, R. M. Yusupov. *Identification and technical diagnostics. Textbook for high schools*. Leningrad, MO USSR, 1987 (in Russian). = А. К. Дмитриев, Р. М. Юсупов. *Идентификация и техническая диагностика. Учебник для вузов*. Л, МО СССР, 1987.
- [3] V. B. Myshko [and others]. *Theoretical bases and methods for optimizing the analysis of the technical state of complex systems: monograph*. St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy, 2013 (in Russian). = В. В. Мышко [и др.]. *Теоретические основы и методы оптимизации анализа технического состояния сложных систем: монография*. СПб, ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013.
- [4] O. G. Lazutin. *Technique of communicating information about the technical state of space facilities using data compression algorithms and cognitive graphical representation*. St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy, 11–17, 2016 (in Russian). = О. Г. Лазутин. *Методика доведения информации о*

техническом состоянии космических средств с использованием алгоритмов сжатия данных и когнитивного графического представления. С.-Петербург, ВКА им. А.Ф.Можайского, 11–17, 2016.

- [5] E. V. Kopkin, V. A. Chikurov, V. V. Aleynik. Algorithm for Constructing a Flexible Program for Technical Object Diagnosing on the Criterion of Received Information Value. *Tr. SPIIRAN*, 41: 106–130, 2015. = Е. В. Копкин, В. А. Чикуров, В. В. Алейник, О. Г. Лазутин. Алгоритм построения гибкой программы диагностирования технического объекта по критерию ценности получаемой информации. *Труды СПИИРАН*, 41(4): 106–130, 2015.
- [6] E. V. Kopkin, A. N. Kravcov, O. G. Lazutin. Discrete diagnostic signs selection by their value for recognition of object technical condition *Information and Space*, (2):111–117, 2015 (in Russian). = Е. В. Копкин, А. Н. Кравцов, О. Г. Лазутин. Выбор дискретных диагностических признаков с учетом их ценности для распознавания технического состояния объекта. *Информация и космос*, (2):111–117, 2015.
- [7] M. Hu. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants *IRE Trans. Inf. Theory*, 8:179–187, 1962.
- [8] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, S. L. Eddins *Digital Image Processing Using MATLAB*. 2nd ed., USA, Gatesmark Publishing, 2009. = Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. *Цифровая обработка изображений в среде MATLAB*. Москва, Техносфера, 2005.

State estimation of complex object via invariants

Anatolii D. Khomonenko

Petersburg State Transport University (St. Petersburg, Russia)

Evgeny L. Yakovlev

Mozhaiskiy Space Military Academy (St. Petersburg, Russia)

Abstract. The article deals with a way of describing and presenting a plurality of technical states, which may be the object under study, using moments of the invariants. A special feature is the ability to represent each specific of a technical state a complex object is not a set of diagnostic features, and with the help of a small set of moments invariant values, which are calculated on the basis of a portrait of a technical state of the object.

Keywords: technical state, diagnostic features, invariant moments.