УДК 629.7.05

МОДЕЛИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ОБЪЕКТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

© 2008 А. Н. Коптев[1], Д. С. Ергалиев[2], К. Ж. Саханов[2]

[1]Самарский государственный аэрокосмический университет
[2]Военный институт Сил воздушной обороны министерства обороны Республики Казахстан

Рассматривается модель формирования набора измеряемого множества параметров для оценки технического состояния бортового комплекса оборудования (БКО) воздушного судна в рамках диагностической системы управления, представляемой сетью, в которую введены образующие как базовые образы. Предложены набор аксиом для формирования на базе вектора признаков оценки состояния образующих, представляющих диагностируемую систему БКО, и архитектура системы диагностического управления состоянием объекта технического обслуживания в виде сети, функционирование которой связано с введённой системой аксиом.

Модель, диагностируемый объект, множество, образующая, образ, конфигурация, сеть, система, диагностическое управление, вектор, признак, пространство, техническое обслуживание

Рассмотрим подход к моделированию систем диагностического управления состоянием сложных систем бортового комплекса на базе методов теории распознавания образов [1].

Пусть задана некоторая конфигурация образующих G^a из множества образующих *G:*

$$C = (g_1; g_2; ...; g_m), c \in b(\Re), \qquad (1)$$

регулярная в смысле $b(\Re)$. Тогда, чтобы произвести оценку её состояния, необходимо измерять параметры образующих в среде БКО, т. е. информацию, характеризующую конфигурацию для $p \in P$.

Необходимо произвести предварительную обработку этой информации, а затем передать её в сеть *N* - диагностическую систему управления (процессор отображения), которая в состоянии изменять сама себя для того, чтобы сравнивать базовые образы, принятые в среде БКО, с полученными в результате взаимодействия конфигураций среды БКО. Это достигается при помощи изменения коэффициентов связи *N*, т. е. модификации процессора изображений, который представляет собой *N*. Осуществляемый в результате вывода образ относится к индуктивному типу. С помощью наблюдения, происходящего в среде, сеть *N* будет в состоянии всё в большей и большей степени понимать окружающую структуру образов [2].

Рассмотрим конфигурацию, в которой $c = \{g\}$ состоит из единственной образующей *g*. Вектор её признаков состоит из подвекторов $a(g)$. Вектор $a(g)$ представлен в виде сенсорного вектора $u(t)$, элементы которого принадлежат сенсорному пространству *U*.

В носителе информации применено импульсное кодирование с частотной модуляцией. Будем считать, что действительная частота повторения импульсов отличается от u_{sp} самопроизвольной частоты повторения импульсов на положительную или отрицательную величину в зависимости от истинностных значений в векторе признаков. Форма импульса будет фиксирована и точно задана на временной шкале ожидаемых междуимпульсных интервалов.

Для признака каждого типа *v* на A_v будет задана некоторая алгебра множества a^v, индуцирующая на *A* алгебру-произведение:

$$a = a^1 \times a^2 \times a^3 \times ... \qquad (2)$$

Алгебра множеств имеет следующую интерпретацию: она показывает, насколько подробна информация, содержащаяся в сенсорном входном сигнале. Если смысл очень информативен, т. е. P располагает мощной аппаратурой, то алгебра множеств является точной в техническом смысле слова, и наоборот.

Среди множеств, принадлежащих алгебре a_v, выделим непустые множества, не содержащие собственных подмножеств. Естественно, что число подобных множеств конечно: $j_1^v, j_2^v, j_3^v \ldots$.

Множество A^v в целом представляет собой объединение всех множеств j_j^v, поскольку в противном случае

$$k = A^v \; \mathbf{I} \; (j_1^v \, \mathbf{U} \, j_2^v \, \mathbf{U} \, j_3^v \ldots) \neq \varnothing, \tag{3}$$

где A^v - измеримое множество k не может, однако, не допускать разбиения на меньшие a^v - измеримые множества, так как в этом случае оно оказалось бы равным некоторому множеству j_i^v, что противоречит (3). С другой стороны, его нельзя представить в виде объединения $j_{i_1}^v \, \mathbf{U} \, j_{i_2}^v \, \mathbf{U}$, поскольку в этом случае

$$k = j_{i_1}^v \, \mathbf{U} \, j_{i_2}^v \, \mathbf{U} \ldots (\mathbf{I} (j_1^v)^c \; \mathbf{I} \; (j_2^v)^c \ldots) \neq \varnothing. \tag{4}$$

Следовательно, $k = j$, и поэтому

$$A^v = j_1^v \, \mathbf{U} \, j_2^v \, \mathbf{U} \, j_3^v \ldots \tag{5}$$

Тогда для любого a^v - измеримого множества F, принадлежащего A^v, получаем

$$F = (A^v \; \mathbf{I} \; F) = (F \; \mathbf{I} \; j_1^v) \; \mathbf{I} \; (F \; \mathbf{I} \; j_2^v) \; \mathbf{I} \ldots \tag{6}$$

В правой части выражения (6) имеет место либо $j_i^v \subseteq F$, либо $j_i^v \; \mathbf{I} \; F = j$, поскольку множества j_i^v не поддаются разбиению. Это означает, что члены, входящие в объединение, либо равны некоторому множеству j_i^v, либо представляют собой пустые множества.

Первая аксиома о диагностируемых объектах сформулирована в виде условия измеримости относительно алгебр множеств a^v.

Аксиома 1. Сенсорное пространство U представляет собой прямое произведение признаковых сенсорных подпространств U_1, U_2, … :

$$U = U_1 \times U_2 \times U_3 \times \ldots, \tag{7}$$

и компоненты вектора $u(g)$ в подпространстве U^v определяются следующим образом:

$$u_i^v(g) = u_0 \cdot \# \left\{ f_i^v(g) = ИСТИНА \right\}$$
$$\text{при } f_i^v \in j_j^v \}, \tag{8}$$

где u_0 - случайная величина с нулевым математическим ожиданием и дисперсией V; для всех v величина u_0 одна и та же. Носителем u_0 является вся ось действительных чисел, и в нуле дискретной вероятности не имеется.

Всё это относится к отдельной образующей. Обратимся к некоторой регулярной конфигурации

$$C = (g_1; g_2; \ldots; g_n) \in b_n(\Re).$$

Описанная кодировка $u = u(g)$ даёт некоторый сенсорный вектор u, воздействующий на сеть N в течение определенного периода времени. Сначала g_1 представляется в виде $u(g_1)$ и подаётся в течение некоторого времени на сеть N, затем g_2 представляется в виде $u(g_2)$ и подаётся на N и т. д. В дополнение к подобному кодированию будем допускать быстрое сканирование конфигурации, когда P пытается изучать конфигурацию как единое целое. Это означает, что конфигурация, у которой $n > 1$, предстаёт перед специалистом как последовательность параметров P. Вектор u как функция времени будет в таком случае некоторой периодической функцией, например с периодом. Поэтому

$$\begin{aligned} &u = u\,(g_1) \text{ в течение времени } Dt_1, \\ &u = u\,(g_2) \text{ в течение времени } Dt_2, \\ &\ldots \\ &u = u\,(g_n) \text{ в течение времени } Dt_n, \\ &t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \ldots + \Delta t_n, \end{aligned} \tag{9}$$

а затем следуют периодические повторения. Скорость сканирования по конфигурации с ограничена лишь инерционностью приборов, которыми располагает P: $Dt_1 \rangle t_{scan}$. Максимальная длина кадра не ограничена. Во всех представлениях $u(g_1)$, $u(g_2)$ будет использоваться одно значение u_0, т. е. для конфигурации в целом кодирование когерентно. Отношения Dt_r / Dt характеризуют внимание, уделяемое P образующим, из которых состоит наблюдаемая конфигурация объектов. Они представляют собой неотрицательные числа, прибавляемые к 1.

Аксиома 2. 1) Конфигурация, принадлежащая $b(\Re)$, представляется некоторой периодической кусочно-постоянной функцией времени, принимающей значения $u(g_1)$, $u(g_2)$ и т. д., причём кодирование когерентно.

2) Различные конфигурации представляются указанным способом, но с использованием статистически независимых значений u_0.

Аксиома 3. 1) Под диагностируемым объектом будем понимать линейный оператор L, получаемый как некоторая линейная функция проекционных операторов P_j :

$$L = \sum_{vj} l_j^v P_j^v , \tag{10}$$

где l_j^v - действительные постоянные; P_j^v - оператор проекции, который в U проектирует на j-е измерение j_j^v v-го сенсорного подпространства. Аналогично P^v должен проецировать на v-е сенсорное подпространство.

2) Под диагностическим высказыванием будем понимать диагностируемый объект, представляющий собой некоторую проекцию.

Рассмотрим некоторую конфигурацию c={g} с одной образующей, переведённую в представление $u(g)$ за время, в течение которого c наблюдалась. Повторим это наблюдение, воспроизведя конфигурацию несколько раз, т. е. воспользовавшись различными независимыми значениями u_0 (аксиома 1).

В частном случае, когда оператор L обращается в некоторую проекцию P_j^v, эта величина принимает следующий вид:

$$V\left[\#\left\{f_i^v(g) = ИСТИНА,\ f_i^v \in j_j^v\right\}\right]^2 , \tag{11}$$

так что известные значения математического ожидания будут определять значения в квадратных скобках в (11), поскольку V - это известная постоянная. Следовательно, две образующие g и g` можно различить (теоретически), если

$$\#\left\{f_i^v(g) = ИСТИНА, f_i^v \in j_j^v\right\} \neq \#\left\{f_i^v(g') = ИСТИНА, f_i^v \in j_j^v\right\} \tag{12}$$

по крайней мере, для некоторых пар (v, j).

Отображение

$$g \to (E\left\| P_j^v u(g)\right\|^2 ; j = 1,2,...) \tag{13}$$

представляет G в виде векторов, компонентами которых являются целые неотрицательные кратные V значения. В случае, когда a состоит из всех подмножеств A, значение этого отображения определяет значение истинности каждого бинарного признака, так что образующая g определяется однозначно. Если a более ограничена, что соответствует менее мощному приборному оснащению Ω, то отдельные образующие не всегда можно отличить друг от друга.

Выше была введена статическая среда, в которой действует Ω, и тем самым на сенсорном пространстве U было задано некоторое распределение вероятностей. Рассмотрим однообразующие конфигурации. Из (13) следует, что математическое ожидание сенсорного вектора равно нулю:

$$E[u(g)] = \int_G u(g) Q_1(dg) = 0 . \tag{14}$$

Введём ковариации

$$\Gamma = E\left[u(g) u^T(g)\right] = \int_G u(g) u^T(g) Q_1(dg). \tag{15}$$

В частном случае счётной среды, когда в exp(P) могут входить лишь определённые объекты g_1, g_2, ..., характеризующиеся вероятностями $Q_1(g_1)$, $Q_2(g_2)$, ..., получаем

$$\Gamma = \sum_m u(g_m) u^T(g_m) Q_1(g_m) . \tag{16}$$

Ковариации включают большую часть, но не все существенные факты о exp(*P*). Величину *Г* будем называть оператором опыта.

Важное следствие предложения (16) заключается в том, что можно ожидать взаимной (почти) ортогональности $u(g)$. Таким образом, собственные векторы оператора опыта представляют собой (почти) сенсорные векторы существенно разных объектов. Их собственные значения равны

$$Q_1(g_m)\left\|u(g_m)\right\|^2 = Q_1(g_m) \text{ энергия } \left[u(g_m)\right]. \quad (17)$$

Введём ядро в сенсорном пространстве *U* оператора опыта *Г*

$$A(\Gamma) = \{u \mid \Gamma u = 0\} \subset U\ , \quad (18)$$

которым будет удобно пользоваться при описании характеристик обучения.

Ядро *A* (*Г*) для счётной среды с одноатомными конфигурациями представляет собой ортогональное дополнение линейного замыкания $Lin\{u(\exp(\Omega)\}$.

<u>Доказательство</u>. Произвольный сенсорный вектор *u* можно записать как

$$u = \sum_{g_\aleph \in \exp(W)} e_\aleph u(g_\aleph) + u'' = u' + u''; u'' \perp Lin\{u(\exp(W))\}. \quad (19)$$

Поскольку оператор *Г*, определяемый выражением (19), обладает тем свойством, что $\Gamma u''=0$, то для того, чтобы обеспечить и $u \perp A(\Gamma)$, $\Gamma u=0$, необходимо и достаточно выполнения условий: $\Gamma u' = 0$. Оператор *Г*, однако, является симметрическим, и его сужение на линейное замыкание *Lin* несингулярно. Действительно, если *u* - линейное замыкание $u(\exp(\Omega))$ и $\Gamma u=0$, то из (17), (18) следует, что

$$u^T \Gamma u = \sum_m \left(u^T u(g_m)\right)^2 Q_1(g_m) = 0\ . \quad (20)$$

Поэтому $u \perp u(g_m)$ для всех μ, поскольку $Q_1(g_m) \rangle 0$ для всех μ, так как ограничились носителем $\exp(\Omega)$ от Q_1. Следовательно, $u \in A(\Gamma)$ тогда и только тогда, когда $u' = 0$, и поэтому u'' принадлежит ортогональному дополнению линейного замыкания.

Отображение *u* отображает exp(*P*), но не всегда на *Lin*. Отметим, что множество *u*(exp(*P*)) можно сделать линейно замкнутым, введя в exp(*P*) следующие фиктивные объекты, обладающие неисправностями различных видов, т. е. деформированные объекты. Если g_1 и $g_2 \in \exp(P)$, то, естественно,

$$u = c_1 u(g_1) + c_2 u(g_2) \in Lin\ ,$$

но при этом не должно быть объекта *g* такого, что $u = u(g)$. Подбирая соответствующие значения u_0, можно добиться того, чтобы u был суммой, которая соответствует образующим, когда числа, входящие в правую часть (20), являются натуральными числами. Следовательно, признак определяется на *a* и задан новый «объект».

Считается, что эти фиктивные объекты оказывают существенное влияние на характеристики обучения Ω. Отметим, что при построении фиктивных объектов используются различные значения u_0, т. е. действует условие некогерентности.

Аддитивный шум, налагаемый на вектор *y*, не вызывает сколько-нибудь существенных изменений. Поэтому вводится специальная аксиома.

Аксиома 4. Кодированное представление переменной входной величины определяется как

$$u(t) = \int_{-\infty}^{t} w(t-s) u_s(s) ds\ , \quad (21)$$

где $u_c(s)$ представляет величину, определяемую выражением (21) в любой момент времени s; *w*-весовая функция.

Временное суммирование в (21), представляющее периферийную обработку, выражается с помощью временной весовой функции *w*, соответствующей постоянной времени t_c. Её необходимо учитывать только в тех случаях, когда предъявляемые образующие быстро сменяют друг друга. Единственное допущение, необходимое для $w(t)$, заключается в том, что $w(t) = O(t^2)$, $t > 1$.

Кодирование, определяемое (21), не обладает мощностью, достаточной для передачи всей информации, необходимой P для изучения env(P). Отказавшись на время от u_0 в (21), положив $u_0 = 1$, решаем данную проблему при помощи уплотнения (мультиплексирования) сенсорного вектора и введения входного поля у сети. Для этого потребуется следующая аксиома.

Аксиома 5. Для заданного сенсорного вектора $u = u(g)$ сформируем уплотнённый вариант (порядок уплотнения, или кратность m)

$$u = u \otimes u \otimes \ldots \otimes u \quad (m \text{ раз}), \tag{22}$$

где y принимает значения в пространстве входных сигналов

$$Y = U \otimes U \otimes \ldots \otimes U . \quad (23)$$

Вновь вводим коэффициент когерентности u_0. Для этого y заменяется на $u_0 y$. В данном случае u_0 обладает теми же, что и прежде, свойствами.

Оператор уплотнения $\otimes$ имеет следующий смысл. Если задан некоторый вектор $u = (u_i)$, то его уплотнённым с кратностью m вариантом является m-мерный массив с элементами $u_{i_1}, u_{i_2}, \ldots, u_i$ - результат перемножения компонент. Кратность m отнюдь не столь велика, как исходные размерности U и U^v.

Для простоты будем предполагать, что во всей системе порядок уплотнения один и тот же. В качестве обобщения этого случая можно рассмотреть ситуацию, когда кратность изменяется в системе от 1 до некоторого максимума. Если, в частности, информационный носитель системы обладает высокой избыточностью, то целесообразно уплотнять лишь некоторую часть каждого сенсорного подпространства.

Рисунок 1 даёт представление о типе архитектуры системы диагностического управления состоянием объекта технического обслуживания специалистами ($p \in P$), включающей аппаратуру и программно-аппаратное обеспечение.

Диагностируемый при обслуживании объект в соответствии с аксиомой 1 может быть представлен как некоторая среда признаков, характеризующих этот объект, и представляющий собой прямое произведение пространств признаков A^v. Для признака типа v на каждый признак A^v, как указывалось выше, задана алгебра множеств a^v, которая показывает полноту информации, содержащуюся в сенсором входном сигнале Y. При этом каждый полученный вектор о состоянии конфигурации уплотняется для специалиста P на основе a^v-измеримого множества и полученных подвекторов для каждой образующей $U = U(g_i)$ в течение времени $t = \sum_{i=1}^{n} Dt_i$. Будем полагать, что уплотнение физически происходит в пределах основного процессора. Можно считать, что N - это основной процессор, включающий аппаратуру и программно-аппаратное обеспечение; система микропрограммирования последнего может модифицировать N. Тогда можно говорить об уплотнении в результате вычислений в N, а не за счёт каких-либо специализированных устройств.

При этом необходимо вводить частичное уплотнение порядка m. Это означает, что формируются не все возможные произведения компонент вектора u, а лишь часть из них.

В соответствии с вышеизложенным, P может самое большее идентифицировать объекты в той степени, в какой это допускает алгебра множества. Поэтому будем считать, что высказывания могут быть представлены в виде булевой функции от комбинированных признаков j_i^v.

В рамках сети формулируется некоторое исчисление высказываний о диагностируемых объектах, которое связывает соответствующие высказывания с P в пространстве входных сигналов Y. Простое высказывание, содержащее признаки только типа v, можно записать в виде

$$C = \bigvee_{E} j_j^v , \tag{24}$$

где дизъюнкция берётся по некоторому множеству E пар (n, j), $E \hat{I} a^n$.

На базе этих высказываний формируются управляющие воздействия, т. е. некоторый оператор $O(c)$, приводящие к изменению состояния (деформации) объекта диагностики. Оператор, построенный для высказыва-

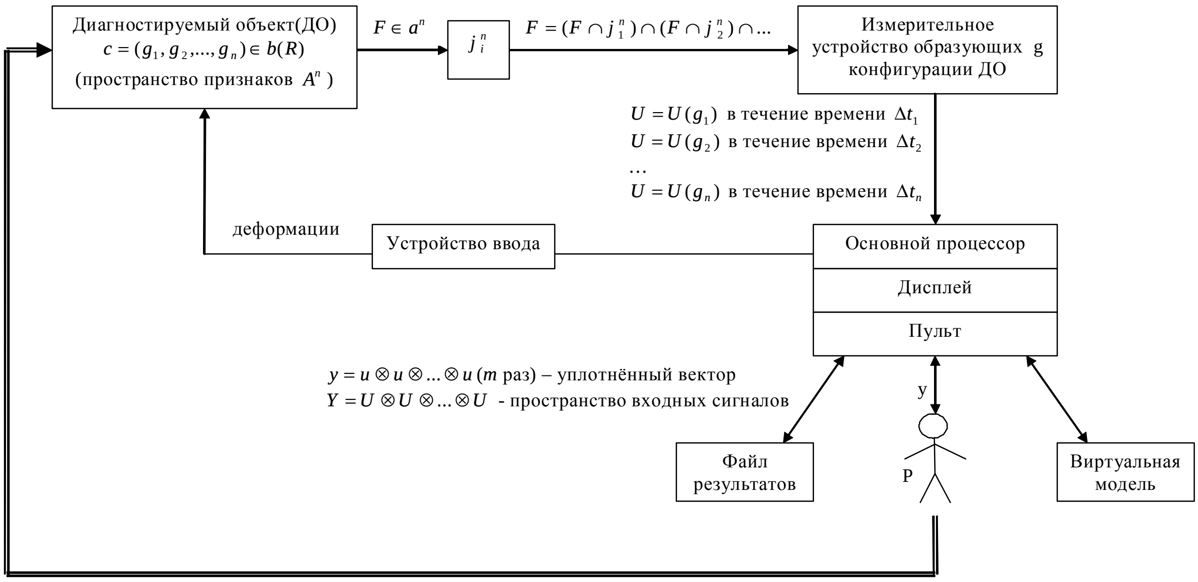

Рис. 1. Сеть системы диагностического управления состоянием объекта технического обслуживания

ния C, активируется некоторым сенсорным вектором $u = u(g)$ тогда и только тогда, когда $C(g)$ = ИСТИНА.

Следуя предложенной методике, можно построить исчисление высказываний для управления состоянием диагностируемого объекта.

Библиографический список

1. Лекции по теории образов У. Гренандер [Текст]. В 3т. Т.1. Синтез образов. – М.: Мир, 1979. – 382 с.
2. Лекции по теории образов У. Гренандер [Текст]. В 3т. Т.2. Анализ образов. – М.: Мир, 1981. – 448 с.

Информация об авторах

Коптев Анатолий Никитович, заведующий кафедрой эксплуатации авиационной техники, доктор технических наук, профессор, СГАУ. Техническая диагностика и оценка состояния систем бортовых комплексов оборудования для формирования упреждающих технологий обслуживания.

Ергалиев Дастан Сырымович, начальник кафедры конструкции и эксплуатации авиационных двигателей Военного института Сил воздушной обороны МО республики Казахстан, кандидат технических наук, доцент. Техническая диагностика и оценка состояния систем бортовых комплексов оборудования для формирования упреждающих технологий обслуживания.

Саханов Канат Жаксылымович, заместитель начальника кафедры конструкции и эксплуатации авиационных двигателей Военного института Сил воздушной обороны МО республики Казахстан. Техническая диагностика и оценка состояния систем бортовых комплексов оборудования для формирования упреждающих технологий обслуживания.