УДК 62.01.4

Коптев А.Н., Гареев А.М., Яковенко Н.А.

ФОРМИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИАГНОСТИКИ БОРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ОБОРУДОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Оценка состояния сложных систем бортового комплекса оборудования воздушных судов (БКО ВС) представляет собой многоитерационный процесс, лежащий в основе системы эксплуатации.

Организация сложного процесса эксплуатации БКО ВС содержащего в себе процесс контроля технического состояния, требует создания диагностических систем управления этим процессом для реализации упреждающих технологий обслуживания. Исследования этих процессов управления проводится в рамках технической диагностики в терминах результирующего поведения системы БКО ВС. Решение проблемы оценки состояния этой системы проводится, исходя из аксиомы, что система представляет совокупность функционально простых блоков, называемых ее образующими.

Подход будет основан на дедукции, а не индукции по результатам наблюдений. Для решения задач оценки состояния систем БКО ВС введем ряд начальных допущений, т.е.аксиом.

Выбирая аксиомы, будем вводить радикальные упрощения. Основная цель заключается в построении логической системы, по возможности простой, позволяющей прийти к результатам, которые отражали бы некоторые существенные свойства обучаемости и памяти специалиста по техническому обслуживанию.

В рассматриваемом случае, наиболее важные аксиомы – это те, которые характеризуют среду, порождающую сенсорные входные сигналы. Последние будут предполагаться существенно структурированными и, как ниже будет показано в рамках теории образов, обладающими регулярной структурой.

Допущение о высокой структурированности среды с БКО, входящей в состав макросистемы «Техническая эксплуатация» (ТЭ) - P, относится к числу основополагающих.

Признаки g формируются из частичных признаков различных типов. Для каждого типа v значениями подвектора $a^v(g)$ будут булевы векторы конечной, но часто очень высокой размерности. Следовательно, любая компонента $f_i^v(g)$ вектора $a^v(g)$ может принимать лишь два значения: «истина» и «ложь». Поэтому f_i – бинарные признаки, а вектор $a^v(g)$ интегрирует измеримые параметры для оценки состояния образующей g.

Тип признака может иметь различные физические интерпретации. Приведём несколько примеров:

v =1: локализационный тип, характеризующий расположение отмеченной точки образующей g в пространстве R^3;

v =2: ориентационный тип, характеризующий ориентацию g, например, с помощью единичного вектора;

v =3: объёмный тип, указывающий множество, покрываемое g со стандартными расположением и ориентацией.

На основе этих трёх типов признаков можно вычислить другие производные признаки, например, такие, как $V(g)$ - множество в пространстве R^3, покрываемое образующей g при заданной ориентации. Кроме того, можно определять объём $m[V(g)]$, наибольший диаметр g и площадь поверхности. Две последние характеристики представляют собой примеры инвариантных частичных признаков.

Если заданы две образующие g и g' и известны векторы $a^v(g)$ и $a^v(g')$ для v = 1, 2, то можно определить совместные производные признаки, такие, как сопротивление изоляции между двумя отмеченными цепями образующих g и g', соответственно. Если g и g' имеют кинематическую интерпретацию, например качалку и проводку системы управления рулем высоты, направлением или элеронами, то можно определить угол соединения между ними.

Аналогично обстоит дело в случае производных признаков, включающих более чем две образующие

v = 4: зрительный тип. Изображение образующей g будет характеризоваться несколькими элементами общего вида отдельных конструкций или агрегатов ВС.

v = 5: звуковой тип. Он описывает высоту тона, силу и другие характеристики звука, издаваемого g.

v = 6: текстурный тип. Эти частичные признаки описывают автокорреляционные свойства распределения представленных в мелком масштабе высот на поверхности, ограничивающей множество $V(g)$, или, что эквивалентно, спектральную функцию распределения.

v = 7: температурный тип. С помощью этого типа частичных признаков характеризуется тепло, излучаемое образующей g, проводимое от неё.

Для оценки состояния образующих и конфигураций введём следующие аксиомы.

Аксиома 1. Полное пространство признаков среды с БКО, в которой действуют специальные макросистемы *ТЭ-Р*, представляет собой прямое произведение

$$A = A^1 \times A^2 \times A^3 \times ..... \quad (1)$$

пространств признаков A^v, входящих в него систем, каждая из которых, в свою очередь, состоит из конечномерных булевых векторов (fi^v, i = 1, 2, …).

Для представления инвариантностей постоянных взаимосвязей, существующих в БКО, в котором действует *P*, введём отображения $G \to G$ – преобразования подобия. Они отражают то обстоятельство, что и системы БКО, и их комбинации существуют независимо от систем координат, используемых в пространствах признаков. В данном случае координаты представляют собой не просто некоторые координаты в опорном пространстве $X=R^3$, т.е. физическом пространстве, но также и системы отсчёта, используемые для представления.

Чтобы придать нашим рассуждениям конкретный характер, будем считать преобразования подобия, связанные с изменением состояний систем БКО *S* группой переносов в R^3 или соответствующей подгруппой. Но следует заметить, что можно вводить и преобразования других видов, например, повороты или равномерные изменения масштаба (или некоторую их подгруппу).

При этом потребуем, чтобы преобразования подобия *S* удовлетворяли следующей аксиоме.

Аксиома 2. Группа преобразований подобия *S* является конечной, сохранят инвариантность индекса класса образующих $\alpha(g)$:

$$\alpha(sg) = \alpha(g), \forall s \text{ и g} \quad (2)$$

и отображаем каждое A^v в A^v.

Аксиома 3. Рассмотрим все конфигурации с=(g_1, g_2,…, g_n), регулярные относительно $(\Re)$, где n – любое натуральное число. Под потенциальной средой будем понимать среду, состоящую исключительно из этих конфигураций:

$$C = b(\Re) = \bigcup_{n=1}^{\infty} b_n(\Re). \quad (3)$$

Среда для *P* не определяет целиком регулярность $\Re$. Эти правила лишь ограничивают возможные конфигурации множеством $b(\Re)$, но не говорят о том, какова вероятность появления при техническом обслуживании той или иной конфигурации. Для уточнения этой ситуации требуется некоторая мера *Q* в пространстве конфигураций, позволяющая судить о них и об их состоянии относительно регулярных.

Следующая аксиома вводит *Q*.

Аксиома 4. Статистическая среда для P задаётся как

$$C = \left(b\left(\Re\right), Q\right), \tag{4}$$

где Q – некоторая вероятностная мера, заданная на множестве $b\left(\Re\right)$ допустимых конфигураций.

Вид распределения вероятностной меры Q на множестве $b\left(\Re\right)$ определяет то, как P будет исследовать свою среду. Так, P будет встречать только те конфигурации, которые принадлежат носителю Q, и поэтому естественно ввести опыт P(exp(P)):

$$\text{exp(P)-носитель } Q \subseteq b\left(\Re\right). \tag{5}$$

Будем считать, что с течением времени регулярность $\Re$ не изменяется. Это означает, что потенциальная среда $b\left(\Re\right)$ не обнаруживает никаких тенденций, свойственных длительным периодам у временных рядов.

Если Q вообще не включает время, то будем говорить о стационарной статической среде. Конфигурации в таком случае будут получаться независимо из exp(P).

Если P встречается с различными конфигурациями, то Q определяет частоту появления возможных конфигураций. Последовательные конфигурации можно рассматривать как некоторый случайный процесс c(t), принимающий значения из $b\left(\Re\right)$ и характеризующийся кусочно-постоянными реализациями. Значения c(t) тождественно независимо распределены в соответствии с Q при фиксированных значениях t, принадлежащих различным интервалам, на каждом из которых $c(\cdot)$ постоянен. Q является их безусловным (одномерным) распределением. Вес, присвоенный некоторому определённому $c \in b\left(\Re\right)$, будет тогда зависеть от того, сколько долго он может оставаться постоянным в процессе изучения.

Если некоторая конфигурация $c = \left(g_1, g_2, ..., g_n\right)$ остаётся фиксированной в течение некоторого промежутка времени $\left(t, t + \Delta t\right)$, то она представляет статическую среду, причём, если отрезок Δt мал, краткосрочную. Подобные конфигурации будут следовать одна за другой.

Аксиома 5. Функция конфигурации *c(t)* является кусочно-постоянной на временных интервалах длины Δt. Значение с *(t)*определяется аксиомой 4.

Наблюдательные возможности P будут выражены через отношение идентификации R.

Аксиома 6. Две регулярные конфигурации c и c', принадлежащие $c \in b\left(\Re\right)$, идентифицируются по модулю R, если $\#(c)=\#(c')$, когда существует нумерация их соответствующих образующих такая, что $g_i = g'_i$ i=1,2…,#(c), и когда их внешние связи одинаковы при использовании одинаковой нумерации.

Тогда $b(\Re)/R$ образуют алгебру изображений, и можно сформировать образы, которые P наблюдает в идеальных условиях.

Переходя к конкретному языку для формализации знаний в P, т.е. набор эталонных конфигураций, воспользуемся языком исчисления предикатов первого порядка.

Простым высказыванием будем называть всякую дизъюнкцию простых признаков

$$П = П(g) = \bigvee_{(\nu,i)\in F} f_i^{\nu}(g), \tag{6}$$

где f - некоторое множество пар (ν,i).

Если $П$ – простое высказывание, то его можно отождествить с его множеством истинности в G:

$$\{g | П(g) = ИСТИНА\} \subset G. \tag{7}$$

Дизъюнкция признаков соответствует, конечно, объединению их множеств. Тогда определённые совокупности объектов обслуживания можно описать с помощью относящихся к ним высказываний.

В случае описания совокупности объектов систем, которые обладают набором разнотипных признаков, введём сложные высказывания.

В качестве первого шага введём сложные высказывания второго порядка как:

$$C = C(g) = V\left[f_i^{\nu}(g) \wedge f_i^{\mu}(g)\right], \tag{8}$$

где дизъюнкция берётся по некоторому множеству F(*f*) четверок (ν, i, μ, j). В общем виде, определим сложные высказывания порядка μ как

$$C = C(g) = \bigvee_F\left[f_{i_1}^{\nu_1}(g) \wedge f_{i_2}^{\nu_2}(g) \wedge \ldots \wedge f_{i_\mu}^{\nu_\mu}(g)\right]. \tag{9}$$

Другими словами, работаем с логикой признаков порядка μ [1], за исключением того, что поменялись местами роли дизъюнкций и конъюнкций. Как хорошо известно, между конъюнктивными и дизъюнктивными нормальными формами булевых выражений существует двойственность. Эти формы связаны друг с другом через отрицание. Поскольку обе формы математически эквивалентны, то выбор одной из них – вопрос удобства. В рассматриваемом случае, однако, это важный вопрос, так как необходимо ограничить сложность формы либо в терминах дизъюнкций, как это сделано здесь, либо, наоборот, посредством ограничения конъюнкций. Тогда вопрос сводится к тому, что естественнее для описания $C(P)$ – конъюнкция или дизъюнкция ограниченной сложности. Значение μ характеризует структурную сложность высказывания, а мощность множества F характеризует числовую сложность высказывания C.

Всё это относится к случаю единственной образующей и также, естественно, к однообразующей конфигурации, получаемой после обработки множества признаков. Для произвольной регулярной конфигурации

$$c=\left(g_1,g_2,\ldots,g_n\right)\in b_n\left(\Re\right) \tag{10}$$

и соответствующего ей идеального изображения определим сложные высказывания порядка μ в подпространстве конфигураций $b\left(\Re\right)$ как

$$C=C(g)=\bigvee_F\left[f_{i_1}^{\nu_1}(g_{j_1})\wedge f_{i_2}^{\nu_2}\left(g_{j_2}\right)\wedge\ldots\wedge f_{i_\mu}^{\nu_\mu}\left(g_{j_\mu}\right)\right], \tag{11}$$

где F – некоторое множество значений $\left(\nu_1,i_1,j_1,\nu_2,i_2,j_2,\ldots,\nu_\mu,i_\mu,j_\mu\right)$. Здесь диапазон значений i определяется типами признаков; для заданного ν значение i самое большее равно размерности A, а j принимает значение между 1 и μ.

Высказывания самого общего вида записывается в соответствии (9) и (10) в зависимости от того, имеем ли дело с единственной образующей или конфигурацией, причём число признаков в конъюнкции не ограничивается. Тогда получим высказывания с неограниченной структурной сложностью.

Таким образом, рассматривая как исходные определённые предикаты - бинарные признаки, формируем более сложные предикаты. Это приводит непосредственно к исчислению предикатов первого порядка (при добавлении двух кванторов - квантора существования ∃ и квантора общности ∀). Рассматривая некоторое высказывание в техническом смысле этого слова, в исчислении предикатов с переменными и индивидуальными логическими постоянными, и сопоставляя его G или $b\left(\Re\right)$, можно говорить об его истинности или ложности в среде БКО, являющимся окружением для P.

Рассмотрим пример применения высказывания.

Запишем высказывание, установившее, что две образующие g_1 и g_2 (параметры оценки состояния системы БКО) совпадают по одному, в частности, локализационному типу. Пусть, например, они совпадают на участке частотного спектра. Это можно представить как:

$$V_i\left\{\left[f_i^{\nu}(g_1)\wedge f_i^{\nu}(g_2)\right]V\left[\sim f_i^{\nu}(g_1)\wedge f_i^{\nu}(g_2)\right]\right\}, \tag{12}$$

поскольку при любом i обе образующие либо удовлетворяют этому признаку, либо нет. Высказывание имеет порядок μ=2, т.к. в него входят парные конъюнкции. Здесь в высказывание включено отрицание признаков.

Для упрощения записи логических формул типа (12) будем писать $f' = f''$ для булевых выражений:

$$(f' \wedge f'') V (\sim f' \wedge \sim f''), \tag{13}$$

имея в виду, что символ «=» обозначает здесь отношение для парных признаков.

Другим примером использования кванторов существования и общности для некоторых высказываний *B*, заданного на множестве образующих *G* для каждой системы БКО, факт наличия в потенциальной среде БКО какой-либо системы или объекта, для которого это высказывание справедливо, представляется следующим образом:

$$(\exists\ g)\ (B\ g). \tag{14}$$

Подобным же образом, но заменив квантор ∃ квантором ∀, можно сформировать высказывание, утверждающее, что высказывание *B* справедливо для всех систем БКО.

Очень важным для оценки состояния объектов БКО является построение сложных высказываний с применением квантора общности. Так например, если на G заданы два высказывания B_1 и B_2 и если предполагается, что B_1 является следствием B_2, то можно построить высказывание

$$(\forall\ g)\ (B_1(g) \rightarrow B_2(g)). \tag{15}$$

В дальнейшем для целей диагностики нас будут интересовать отношения, инвариантные относительно S [1].

В результате предложенного подхода может быть построено некоторое исчисление высказываний, позволяющих оценить состояние компонент и систем БКО ВС.

Библиографический список

1. Столл, Р. Множества. Логика. Аксиоматические теории [Текст]/ Р. Столл. – М.: Мир, 1980. – 285 с.