Концепция интеллектуального мониторинга технических систем с компенсацией негативных факторов процесса передачи и приема информации

The concept of intellectual monitoring of technical systems with compensating of negative factors of process of transmission and information reception

Шмелев / Shmelev V.
Валентин Валерьевич
(valja1978@yandex.ru)
кандидат технических наук.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ,
заместитель начальника кафедры технологий и средств автоматизации обработки и анализа информации космических средств.
г. Санкт-Петербург

Аванесов / Avanesov M.
Михаил Юрьевич
(avanesov@itain.ru)
кандидат технических наук.
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
научный секретарь.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: теория вычислений – theory of calculations; функционально-логическое программирование – functional-logic programming; потоковые вычисления – stream calculations.

Рассматривается концептуальная основа решения задачи учета и компенсации возмущающих факторов процесса передачи и приема информации при мониторинге технических систем. Представлена математическая постановка задачи. Практическая значимость материала заключается в предложении концептуальных принципов компенсации факторов логической сложности контролируемых систем, доверительной сложности процессов передачи и приема измерительной информации и других факторов. Новизной материала является интерпретация для решения поставленной задачи процедур анализа свойств вычислительных сетей Петри.

The conceptual basis of the decision of the task of the registration and compensating of perturbing factors of process of transmission and information reception at monitoring of technical systems is considered. Mathematical setting of the task is presented. Practical significance of a material consists in a sentence of conceptual principles of compensating of factors of logic complexity of controllable systems, confidential complexity of processes of transmission and reception of the measuring information and other factors. Novelty of a material is interpretation for the decision of a task in view of procedures of the analysis of properties of computer networks the Petri.

Введение

Современное развитие информационных технологий позволяет реализовать на практике концепцию единого информационного пространства в различных, технически и организационно сложных областях деятельности [1, 2]. Единство информационного пространства является необходимым условием «сквозного», т.е. на протяжении всего жизненного цикла технической системы (ТС), автоматизированного мониторинга процессов проектирования, изготовления, испытаний, применения, а также обработки и анализа информации ТС. Основной проблемой, подлежащей при этом решению, является отсутствие единых принципов моделирования и последующего контроля процессов целевого функционирования ТС. Причиной данной проблемы является сложность учета факторов различной природы, негативно обуславливающих процесс формирования, передачи, приема, обработки и анализа измерительной информации о ТС.

Одним из решений указанной проблемы является информационная технология интеллектуального мониторинга. Под мониторингом понимается автоматизированный синтез, контроль и корректировка моделей процессов формирования, передачи, приема и анализа информации при производстве, испытаниях и применении ТС в различных предметных областях [3]. Об интеллектуальности мониторинга можно говорить, когда при нем начинают учитываться различные факторы, сопровождающие и, особенно, усложняющие названные процессы.

4 2017.indd 101 12.12.2017 11:25:37

Теоретической основой такой информационной технологии является метод интеллектуального мониторинга ТС на основе функционально-логических программ потоковых вычислений. Данный метод представляется совокупностью следующих элементов:

1. Концептуальная модель интеллектуального мониторинга состояния ТС с компенсацией возмущающих факторов на основе функционально-логических моделей вычислений.

2. Модели интеллектуального мониторинга с использованием вычислительных сетей Петри [4] и G-сетей [5] с предикативно-операторным расширением.

3. Метод синтеза функционально-логических программ потоковых вычислений на основе системы эквивалентных преобразований с верификацией корректности вычислимости.

4. Метод организации потоковых вычислений с использованием модифицированных цветных сетей Петри.

Настоящий материал непосредственно посвящен первой составляющей, являющейся основой или деревом целей и задач компенсации при мониторинге факторов, возмущающих процесс передачи и приема информации.

В статье вводится или доопределяется ряд понятий. Программой называется система вычислений, которая для некоторого набора исходных данных позволяет по однозначно определенной последовательности действий, выполняемых «механически» без участия человека, получить некоторый результат [6, 7]. Функционально-логической программой называется программа, создаваемая в результате применения принципов функционального программирования [8] (в данном случае используется вызов единой функции с различными параметрами) с реализацией логических взаимосвязей между операторами (операциями). Под потоковыми вычислениями понимается обработка информации различного рода (измерительной, технологической), характеризующей ТС. Особенностью процесса обработки такой информации является необходимость обеспечения возможности параллелизма и асинхронности выполнения отдельных операций и их совокупностей, т.е. потоков [9–11].

Постановка задачи интеллектуального мониторинга

Для математической постановки задачи интеллектуального мониторинга использован теоретико-множественный подход.

Данные для мониторинга:

1. Исходная спецификация программы мониторинга контролируемого процесса R (кратко программа R) – кортеж:

$$R = < S, L >,$$

где: $S = \{S_k \,|\, k = 1 \ldots \mathrm{card}(I_s)\}$ – множество операций программы R, I_s –множество номеров операций, операция программы может быть проинтерпретирована как распределенный в некотором пространстве длительности выполнения оператор;

$L = \{l_k \,|\, k = 1 \ldots \mathrm{card}(I_s)\}$ – множество кортежей, обуславливающих выполнение операции S_k.

2. Кортеж l_k:

$$l_k = < K_k, t_k, \tau_k >,$$

где:

– $K_k = < B_b^{(k)}(x), B_f^{(k)}(x) >$ – управляющий кортеж операции S_k, состоящий из предикатов;

– $B_b^{(k)}(x)$ – предикат начала выполнения операции, b – «*begin*»;

– $B_f^{(k)}(x)$ – предикат окончания выполнения операции, f – «*finite*»;

– $x \in X$ – аргумент $B_b^{(k)}(x)$ и $B_f^{(k)}(x)$;

– $X = X_1 \cap X_2 \cap X_3$, X_1 – множество первичных результатов измерений параметров ТС, X_2 – множество вторичных (вычисляемых) характеристик ТС, $X_3 = \{f(B_b^{(k)}),\ f(B_f^{(k)}) \,|\, k = 1 \ldots \mathrm{card}(I_s)\}$, X – множество возможных типов аргумента x;

– t_k – момент начала выполнения операции S_k;

– τ_k – длительность операции S_k. Величины t_k и τ_k могут быть представлены и с помощью предикатов, соответственно: $B_b^{(k)}$, $B_f^{(k)}$.

3. Система показателей качества мониторинга состояния ТС:

– $P = \{p_i \,|\, i = 1 \ldots \mathrm{card}(P)\}$ – частные показатели;

– $P_{\text{тр}} = \{p_{\text{тр}i} \,|\, i = 1 \ldots \mathrm{card}(P_{\text{тр}})\}$ – требуемые значения частных показателей;

– $P_{\Sigma} = f(P)$ – единый комплексный интегральный показатель качества.

Требуется найти:

1. S – структуру формального описания унифицированной модели типовой операции программы потоковых вычислений, такую что:

– $\exists S(t) \rightarrow y, S\{t^l\} \rightarrow y^l, y \neq y^l \rightarrow S(t) \neq S\{t^l\}$, где y и y^l – текущее и последующие ее выходные параметры, $S(t)$ и $S\{t^l\}$ – текущее на момент t и последующее на момент t^l состояния модели;

– $\exists u(t) : S(t) \rightarrow S\{t^l\}$, где $u \in U$ – вариант управлений моделью, множество вариантов управлений $U = \{$«Старт», «Стоп», «Приостановка», «Возобновление», «Изменение состояния операции»$\}$.

2. R^l – структуру формального описания функционально-логической программы потоковых вычислений, такую что:

– $S_k \in R^l$, $k = 1 \ldots \mathrm{card}(I_s)$;

– на $\{S_k \,|\, k = 1 \ldots \mathrm{card}(I_s)\}$ для отношений следования (O_1), независимости (O_2), несовместности (O_3) и совместности (O_4) выполняются аксиомы, определяющие наличие свойства частичного порядка:

$S_k(S_k O_j S_k)$ – свойство рефлексивности;

$S_{k1,k2,k3}(S_{k1} O_j S_{k2}) \cap (S_{k2} O_j S_{k3}) \rightarrow (S_{k1} O_j S_{k3})$ – свойство транзитивности;

$S_{k1,k2}(S_{k1} O_j S_{k2}) \cap (S_{k2} O_j S_{k1}) \rightarrow (S_{k1} = S_{k2})$ – свойство антисимметричности, $\forall k, j = 1..4$;

4 2017.indd 102 12.12.2017 11:25:39

3. Q – структуру формального описания технических ограничений программы или контролируемого процесса, такую что:

$$Q=\{q_k \mid k=1...\mathrm{card}(Q)\}:$$
$$q_k(t) \to q_k(t^I) \Rightarrow Q(t) \to Q\{t^I\} \Rightarrow S(t) \to S\{t^I\} \Rightarrow$$
$$R^I(t) \to R^I(t^I);$$

– $q_k(t) \mid k=1\ldots\mathrm{card}(Q)$ – нестационарная конечномерная конечная функция с дискретными значениями [7].

4. $O: R \to R^I$ – оператор преобразования модели R в конструкцию R^I – оператор синтеза функционально-логической программы R^I, такой что:

– $\exists\mu: R^I \to R$ – μ – оператор ресинтеза R исходной спецификации по синтезированной программе R^I для проверки частичной правильности программы по идентичным пред и пост условиям и проверки завершаемости программы;

– $(\exists\eta=\{\eta_1,\eta_2,\eta_3\}) \cap (\eta_1=1) \cap (\eta_2=1) \cap (\eta_3=1)$, где η_1 – предикат проверки непротиворечивости программы R^I, η_2 – корректности и η_3 – активности.

5. $M: R^I \times R^I \times R^I \times u \to Re$, оператор интеллектуального мониторинга с принятием решения Re о состоянии контролируемой системы, $Re=M(R^I(t_0), R^I(t), R^I(t_{тр}), u(t)), R^I(t_0)$ – начальное состояние, $R^I(t)$ – текущее состояние, $R^I(t_0)$ – требуемое состояние, $u(t)$ – управление процессом, такой что будет выполнено условие пригодности оператора M:

$$Pr(p_i \mid i=1...\ \mathrm{card}(P_{тр})) = «истина»\ ,$$

где:

$$Pr(p_i \mid i=1...\ \mathrm{card}(P_{тр})):$$
$$(p_1 \geq p_{1тр} \cap \ldots \cap (p_{\mathrm{card}(P)} \geq p_{\mathrm{card}(P тр)тр})\ .$$

Вследствие сложности решаемой задачи искомый оператор M может не иметь строгого формального выражения в виде функции, содержащей аргументы и значения. Он может быть представлен как совокупность действий или программа (алгоритм) потоковых вычислений по преобразованию исходных данных в искомый вид.

Концептуальная модель интеллектуального мониторинга технических систем

Концептуальная модель должна включать в соответствии с определением интеллектуальной системы [12] подсистему представления данных и знаний в предметной области и подсистему манипуляции указанными данными и знаниями. На рис. 1 представлена первая подсистема.

На верхнем уровне представлены возмущающие факторы, оказывающие влияние на весь жизненный цикл ТС, искажающие процесс мониторинга. Под искажениями процесса мониторинга понимается при этом

Рис. 1. Подсистема представления данных и знаний об интеллектуальном мониторинге состояния ТС

4 2017.indd 103 12.12.2017 11:25:40

Рис. 2. Подсистема преобразования моделей

не только фактическое искажение значений измеряемых параметров, а комплексное паразитное изменение всего процесса мониторинга: от непосредственного влияния на измерения до нарушения процесса их обработки и анализа вследствие временных ограничений на получение результата соответствующих процессов. Содержание факторов:

1. Техническая сложность контролируемых процессов выражается в разнообразии типов используемой информации: командно-программная информация, телеметрическая информация, технологическая информация, текстовая информация, неформализованные знания и опыт специалистов.

2. Структурная сложность мониторинга заключается в иерархичности контролируемых процессов: «развертка» на одной временной оси всего процесса функционирования ТС невозможна вследствие его чрезвычайной громоздкости.

3. Вычислительная сложность мониторинга определяется большим объемом информации современных сложных организационно-технических систем.

4. Временная сложность определяется директивно заданными сроками мониторинга контролируемых процессов.

5. Доверительная сложность исходной информации заключается в искажениях информации как преднамеренного, так и естественного характера.

6. Логическая сложность мониторинга определяется разнообразием типов зависимостей операций в контролируемых процессах: на практике используются для построения процессов отношения следования, независимости, несовместности и совместности на множестве операций.

7. Структурная и параметрическая динамика экземпляров контролируемых процессов определяется различием изделий ТС одного типа: «абсолютно» идентичных изделий по структуре систем нет, вносит динамику в параметры систем вариация условий применения ТС.

Исходными вершинами представлены привлекаемые теории для синтеза полимодельного комплекса. Вытекающими из исходных вершин представлены подразделы соответствующих теорий, обеспечивающие формирование частных свойств искомого комплекса. В блоках белого цвета в сером обрамлении представлены задачи, решения которых в совокупности определяют пригодность комплекса. Целесообразно рассмотреть подсистему представления данных и знаний как результат решения совокупности задач по обеспечению соответствующих свойств подсистемы.

Теория моделирования систем предоставляет способ решения задачи описания структуры полимодельного комплекса. С этой целью привлекается теоретико-множественное описание систем для составления денотационной семантики, а также синтаксического описания структуры унифицированной модели типовой операции.

Задача описания функционирования моделей интеллектуального мониторинга решается с помощью положений теории вычислений. В качестве инструментальной и методической основы функционирования полимодельного комплекса используется способ формального описания алгоритма с помощью автоматной модели. Непосредственно используется инструмент потоковых вычислений: *G*-сети и цветные сети Петри.

На основе теории множеств решается задача обеспечения пригодности предлагаемого полимодельного комплекса в части выполнения свойства частичного порядка на множестве операций моделируемого процесса функционирования ТС.

Подсистема манипуляции данными и знаниями состоит из двух частей. Первая часть представлена на рис. 2 и заключается в преобразовании информации о процессах функционирования ТС в соответствии с

4 2017.indd 104 12.12.2017 11:25:40

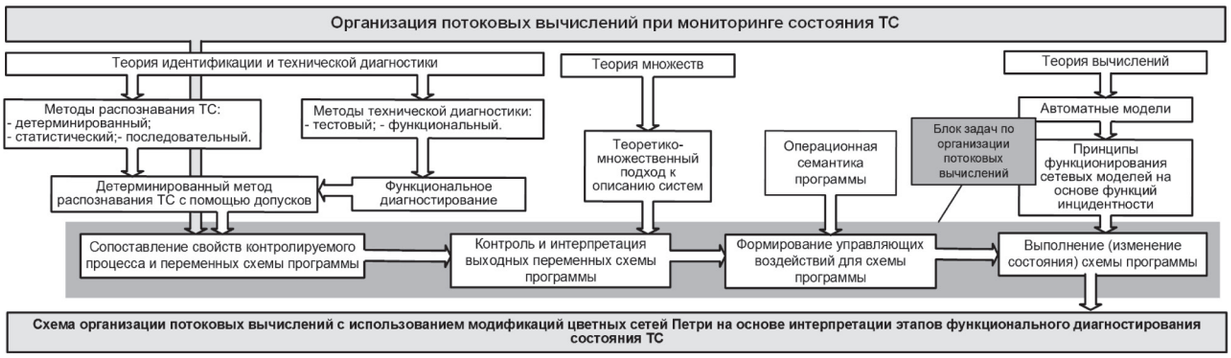

Рис. 3. Подсистема манипуляции моделями

предложенной на рис. 1 структурой описательного полимодельного комплекса.

Представленная на рис. 2 подсистема базируется на положениях теории вычислений и теории моделирования систем. Данные теории предоставляют удовлетворительные средства решения подзадач по компенсации возмущающих факторов. В блоках белого цвета в сером обрамлении представлены преобразования с целью компенсации конкретных факторов.

Привлекается инструмент сетей Петри с модификациями (*G*-сети) с целью компенсации факторов структурной и параметрической динамики экземпляров контролируемых процессов, логической и вычислительной сложности мониторинга. Привлечение положений теории вычислений по формальной верификации вычислительных алгоритмов позволяет решить задачу по компенсации факторов технической, структурной и доверительной сложности мониторинга. Снижение вычислительной сложности мониторинга является актуальной задачей во многих предметных областях, где контролируемые технические системы являются большими и сверхбольшими по объему циркулируемой в них информации.

Теория моделирования систем позволяет получить решение подзадачи формирования исходного представления информации о контролируемом процессе [13]. Оно базируется на рекурсивной модели дискретного параллельного процесса [14] и является «первоначальной» спецификацией программы потоковых вычислений, по которой в дальнейшем будет верифицироваться синтезированная программа.

Таким образом, синтезируемая программа является описанием процесса мониторинга на собственном языке программирования, который можно отнести к языкам верхнего уровня.

Вторая часть подсистемы манипуляции данными и знаниями представлена на рис. 3 и заключается в использовании преобразованной информации с целью мониторинга состояния ТС.

Подсистема манипуляции непосредственно организует мониторинг состояния ТС. Мониторинг вследствие привлекаемых при синтезе программы теорий заключается на внутреннем уровне в функционировании модифицированных цветных сетей Петри. На внешнем уровне мониторинг заключается в интерпретации этапов функционального диагностирования ТС на основе циклической совокупности операций:

1. Сопоставления свойств контролируемого процесса и его модели.

2. Контроля и интерпретации результатов контроля параметров модели.

3. Формирования управляющих воздействий для модели.

4. Выполнения (изменения) состояния модели.

Положения теории вычислений применяются в части принципов функционирования сетевых моделей, а также принципов формирования операционной семантики программы потоковых вычислений, сформулированных в подсистеме описания полимодельного комплекса.

Для практической проверки правильности привлечения подразделов теории вычислений в части сетей Петри и *G*-сетей в качестве теоретической базы интеллектуального мониторинга использована среда CPN Tools [15–17]. В данной системе создавались необходимые модели, которые показали удовлетворение предъявленных требований по компенсации рассматриваемых возмущающих факторов.

Таким образом, рассмотрена в полном объеме концептуальная модель интеллектуального мониторинга. Данная модель позволяет определить средства достижения глобальной цели мониторинга, а именно определение состояния контролируемой ТС, причем будут компенсированы возмущающие факторы процесса приема и передачи информации.

Заключение

В статье была поставлена задача учета и компенсации возмущающих факторов процесса передачи и приема информации при мониторинге ТС на основе функционально-логических программ потоковых вычислений и приводится концептуальная основа ее

4 2017.indd 105 12.12.2017 11:25:41

решения. Данные программы являются языком верхнего уровня при «программировании» процессов формирования, передачи, приема и анализа технической и технологической информации, характеризующей ТС.

Представленный материал базируется на положениях теории вычислений, моделирования систем, теории множеств. Представленная концептуальная модель языка «программирования» вычислительных процессов отличается:

– разработкой полимодельного комплекса интеллектуального мониторинга, сохраняющего на множестве операций контролируемого процесса свойство частичного порядка и охватывающего класс частично-рекурсивных функций;

– реализацией подхода функционального программирования при синтезе программы потоковых вычислений на основе модифицированных цветных сетей Петри;

– формализацией процедур поиска и устранения ошибок на основе интерпретации и проверки свойств сетей Петри и *G*-сетей,

– разработкой процедуры верификации синтезированной программы на основе проверки свойства ее полной (тотальной) правильности.

Практическая значимость и актуальность функционально-логических программ потоковых вычислений заключается в учете при их синтезе различных факторов, негативно обуславливающих процесс мониторинга состояния ТС. Предусматриваются процедуры корректировки синтезированной программы, которые компенсируют факторы логической, технологической, технической и т.п. сложности мониторинга.

Направлением применения представленного метода синтеза программ потоковых вычислений является проектирование схем вычислительных процессов, связанных с обработкой больших данных (Big Data) в сложных условиях. Например, предметной областью внедрения информационной технологии интеллектуального мониторинга может стать космическая деятельность, а именно мониторинг в реальном или близком к нему масштабе времени технического состояния ракетно-космической техники при выполнении ею целевых задач.

Литература

1. Концепция создания и применения перспективной АСУ подготовкой и пуском ракеты космического назначения «Союз-2»: новые подходы к интеграции, интеллектуализации, управлению / Р.Н. Ахметов [и др] // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 4. – С. 3–54.

2. Концепция информатизации Роскосмоса (2010–2015 гг.). Федеральное космическое агентство [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.federalspace.ru/2158, свободный. – Загл. с экрана.

3. Комплексная автоматизация мониторинга состояния космических средств на основе интеллектуальных информационных технологий / О.В. Майданович [и др.] // Информационные технологии. Приложение. – 2011. – № 10. – 32 с.

4. Peterson, James L. Petri Net Theory And The Modeling Of Systems / J.L. Peterson. – Prentice-hall, inc., Englewood Cliffs, N.Y., 1981.

5. Охтилев, М. Ю. Основы теории автоматизированного анализа измерительной информации в реальном времени. Синтез системы анализа: монография / М.Ю. Охтилев. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 1999. – 162 с.

6. Kalman, R. E. Topics in Mathematical System Theory / R.E. Kalman, P.L. Falb, M.A. Arbib – N. Y.: McGraw-Hill, 1969. – 358 p.

7. Парийская, Е. Ю. Сравнительный анализ математических моделей и подходов к моделированию и анализу непрерывно-дискретных систем [Электронный ресурс] / Е.Ю. Парийская // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 1997. – № 1. – Режим доступа: http://www.meta.math.spbu.ru/diffjournal/pdf/j004.pdf, свободный. – Загл. с экрана.

8. Игошин, В. И. Математическая логика и теория алгоритмов / В.И. Игошин. – 2-е изд. – М.: ИЦ «Академия», 2008. – 448 с.

9. Усталов, Д. А. Коллективные потоковые вычисления: реляционные модели и алгоритмы / Д.А. Усталов // Моделирование и анализ информационных систем. – 2016. – № 23(2). – С. 195–210. DOI:10.18255/1818-1015-2016-2-195-210.

10. Лацис, А. О. Параллельная обработка данных / А.О. Лацис. – М.: Академия. 2010. – 336 с.

11. Левин, В. К. Тенденции развития суперкомпьютеров / В.К. Левин // Computational nanotechnology. – 2014. – № 1. – С. 35–38.

12. Анализ перспективных подходов к решению задач комплексного моделирования технологий самоуправляемых вычислений в критических приложениях / А.И. Лектауэрс [и др.] // Труды СПИИРАН. – 2013. – Вып. 6(29). – С. 144–169.

13. Шмелев, В. В. Модели технологических процессов функционирования космических средств / В.В. Шмелев // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 4. – С. 78–93.

14. Лескин, А. А. Сети Петри в моделировании и управлении / А.А. Лескин, П.А. Мальцев, А.М. Спириднов. – Л.: Наука, 1989. – 133 с.

15. Westergaard, M. The Access/CPN Framework: A Tool for Interacting with the CPN Tools Simulator / M. Westergaard, L.M. Kristensen // Proc. of 30th International Conference on Applications and Theory of Petri Nets (Petri Nets 2009). Lecture Notes in Computer Science 5606. – P. 313–322.

16. Jensen, K. Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modelling and Validation of Concurrent Systems / K. Jensen, L.M. Kristensen, L. Wells // International Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT)9(3–4). – 2007. – P. 213–254.

17. CPN Tools for Editing, Simulating, and Analysing Coloured Petri Nets / A.V. Ratzer [et al.] // Proc. of 24th International Conference on Applications and Theory of Petri Nets (Petri Nets 2003). Lecture Notes in Computer Science 2679. – P. 450–462.

4 2017.indd 106 12.12.2017 11:25:41