

Н. С. Абрамов, А. А. Ардентов, Ю. Г. Емельянова,
А. А. Талалаев, В. П. Фраленко, О. Г. Шишкин

Архитектура системы мониторинга и прогнозирования состояния космического аппарата

Аннотация. В работе предложена общая архитектура экспериментальной программно-аппаратной системы мониторинга и прогнозирования состояния космических аппаратов. Описывается функциональная схема интеллектуальной системы контроля неисправностей, способной решать задачи мониторинга и диагностики состояния бортовых подсистем по телеметрическим данным и осуществлять классификацию обнаруженных неисправностей в режиме, близком к реальному времени.

Ключевые слова и фразы: космический аппарат, мониторинг, контроль, архитектура, высокопроизводительные вычисления, телеметрические данные, когнитивный интерфейс.

Введение

Среди приоритетных задач при создании ракетно-космической техники нового поколения особое место занимает задача поддержания и продления жизненного цикла космических аппаратов. Для этого создаются и широко используются автоматизированные системы, осуществляющие мониторинг и прогнозирование состояния бортовых подсистем космических аппаратов (КА) и способствующие повышению их долговечности.

Внедрение современных компьютеризированных контрольно-измерительных комплексов и перспективных интеллектуальных технологий мониторинга, новых датчиков-сенсоров, систем и приборов создает предпосылки для решения задач диагностики, поддержания работоспособности служебных и целевых систем, обработки информации,

Работа выполнена в рамках СЧ НИР шифр «Мониторинг–СГ–1.2.5.1» по Программе Союзного государства «Разработка космических и наземных средств обеспечения потребителей России и Беларуси информацией дистанционного зондирования Земли» и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15–07–00925–а).

© Н. С. Абрамов⁽¹⁾, А. А. Ардентов⁽²⁾, Ю. Г. Емельянова⁽³⁾, А. А. Талалаев⁽⁴⁾,
В. П. Фраленко⁽⁵⁾, О. Г. Шишкин⁽⁶⁾, 2015

© Институт программных систем имени А. К. Айламазяна РАН^(1, 2, 3, 4, 5), 2015

© ООО «Экспо-Термо»⁽⁶⁾, 2015

© Программные системы: теория и приложения, 2015

управления и других интеллектуальных задач. Использование технологий искусственного интеллекта позволяет увеличить оперативность, сократить технологический цикл управления КА.

Перечислим некоторые характерные для систем контроля и диагностики подсистем КА задачи обработки информации:

- определение параметров движения КА и оценка технических характеристик;
- расчет маневров для перевода КА в точку стояния, удержания КА в точке стояния и увода на орбиту захоронения после окончания срока службы;
- прогноз движения КА;
- расчет временных ограничений на работу бортовой и наземной аппаратуры для учета в подсистеме планирования полета;
- расчет векторов состояния КА для закладки на борт;
- отображение телеметрической информации (ТМИ).

Очевидна необходимость пересмотра используемых технологий управления и создания научно-технического задела для разработки перспективной космической техники, конкурентоспособной на мировом рынке космической продукции и услуг, включая:

- создание технических средств и технологий комплексного информационно-навигационного обеспечения и мониторинга;
- внедрение систем искусственного интеллекта для контроля, диагностики и поддержки принятия решений;
- создание перспективного многофункционального наземного комплекса для приема, регистрации и обработки всех видов космической информации.

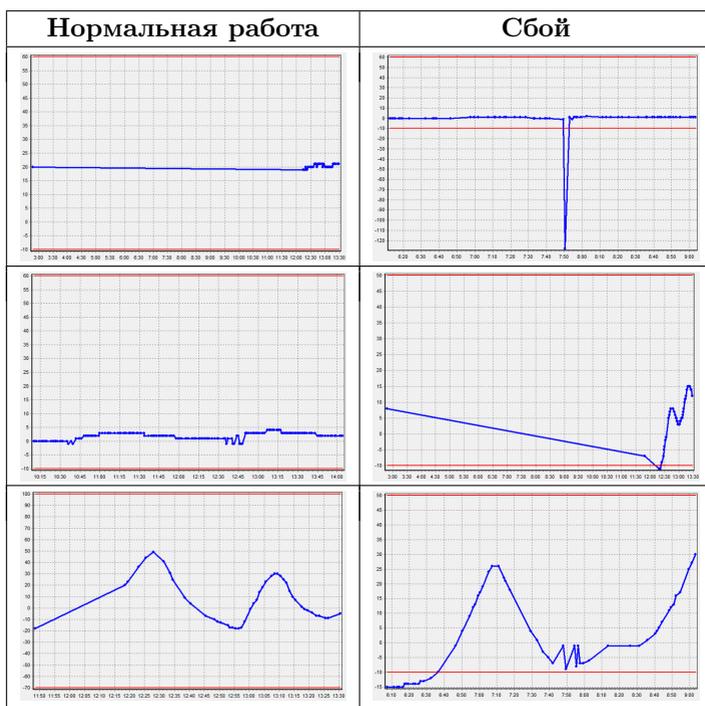
В настоящей работе описана архитектура нейросетевой системы мониторинга и прогнозирования состояния подсистем КА. Разработана и исследована функциональная схема экспериментального образца нейросетевой системы мониторинга состояния и поведения подсистем космических аппаратов по телеметрическим данным в условиях натурной отработки. Детально описан алгоритм обработки ТМИ отдельными модулями системы и выделены особенности их работы.

1. Входные данные системы диагностики

Разрабатываемая система диагностики неисправностей работает с потоком телеметрической информации. На ее вход подаются файлы данных от обслуживаемых бортовых подсистем, в том числе

содержащие показания датчиков температуры, напряжения, силы тока, ориентации и пр. В таблице 1 приведены примеры визуализации телеметрической информации по температурному датчику за определенный отрезок времени, представлен нормальный режим и сбой. Красным цветом показаны границы допустимых значений считываемого показателя (ограничения оборудования).

Таблица 1. Визуализация входных данных



2. Визуализация состояния бортовых систем КА

Известно, что нагрузка на оператора, принимающего решения, существенно снижается, если информация об отклонениях и аномальных ситуациях объекта наблюдения предоставляется в графическом виде, в виде анимационных диаграмм и с использованием технологии гипертекста [1]. Такой подход позволяет быстро раскрывать информацию до нужного оператору уровня детализации, повышая

скорость принятия решений, что крайне важно в критических ситуациях. В работе [2] предложена трехуровневая модель представления информации. На первом уровне (уровень системы в целом) сообщается, в каком (нормальном, аномальном или критическом) состоянии находится КА и в каких его подсистемах возникли отклонения. На втором уровне происходит детализация состояний всех контролируемых подсистем КА. На третьем уровне — информация по измеряемым параметрам (датчикам, сенсорам, конечным узлам подсистем) с указанием значений параметров и динамики их изменения. В статье [3] рассмотрены методы когнитивного представления состояний наземной станции контрольно-измерительных систем (НС КИС) в виде цветоярких образов, которые служат для контроля, диагностики и прогнозирования состояний технических систем НС КИС.

Для рассматриваемой в настоящей работе системы также возможно применение методов когнитивного представления информации о подсистемах КА. Основываясь на трехуровневой системе информирования о состоянии контролируемого объекта [2], предлагается использовать отображение, объединяющее два верхних уровня, как показано в работе [3]. Объединение образов состояния всей системы и ее подсистем позволяет существенно сократить время восприятия оператором визуализируемых данных. Получаем следующую структуру системы предоставления информации о состоянии подсистем КА:

- (1) уровень системы, на котором отображается состояние КА в целом и выделяются подсистемы, в работе которых возникли отклонения;
- (2) уровень подсистем, где выявляется состояние конкретной подсистемы, определяются значения параметров и происходит информирование об их отклонении от нормы.

На рис. 1 показана подобная система визуализации информации о состоянии КА [4]. Графический когнитивный образ отображает состояние контролируемых подсистем (сектора 1–8), включая телеметрию, температурный датчик и др., в секторе 9 располагается информация о текущем состоянии КА в целом, в секторе 10 — обмен служебной информацией и передача специальной информации. Нормальное состояние подсистем и всей контролируемой системы отображается зеленым цветом. При возникновении аномального значения какого-либо из контролируемых параметров, соответствующий сектор образа становится красного цвета. На уровне подсистем происходит детализация возникшей аномальной ситуации в конкретном секто-

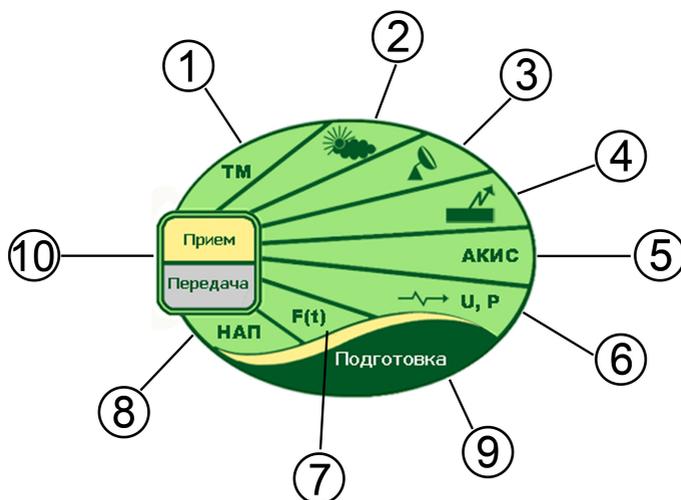


Рис. 1. Когнитивная визуализация состояния КА

ре/подсистеме. При выборе сектора (с помощью манипулятора типа «мышь») появляются уточняющие образы, содержащие информацию о причинах некорректной работы.

3. Архитектура нейросетевой системы диагностики КА

Разрабатываемая система диагностики и мониторинга поведения подсистем КА по телеметрическим данным (далее — «НС Мониторинг») использует искусственные нейронные сети (ИНС), это обосновывается их высокой точностью и полнотой в задачах распознавания и классификации. Ряд научных публикаций показывает, что с использованием ИНС можно достичь точности классификации и прогнозирования не менее 85%. Так, в работе [4] с использованием ИНС и их комитетов решалась задача прогнозирования значений временных рядов, при этом достигнута точность в пределах 78–94,5% при использовании одиночных нейронных сетей и 86–96,3% при использовании комитетов. В работе [5] показано, что при решении задачи диагностики состояния подсистем КА с применением динамической нейронной сети может быть достигнута точность до 82%, а при анализе данных от группировки спутников точность может быть повышена до 88% (три спутника в заданной формации). В работе [6] при решении задачи

контроля потери связи с использованием вероятностной нейронной сети достигнута 100% точность классификации.

«НС Мониторинг» состоит из специализированного планировщика работы (ядро) и программных модулей нейросетевой обработки телеметрических данных, поддерживающих преимущества вычислительной среды, имеющейся на борту КА [7]. Общая архитектура системы представлена на рис. 2.

Для предварительной обработки входных данных (фильтрация, восстановление и пр.) и самого анализа ТМИ в системе используется несколько видов искусственных нейронных сетей: сеть Кохонена, прямого распространения, персептрон, вероятностная ИНС, гибридные (комплексированные) ИНС и др. Кроме того, для повышения эффективности, в системе работают комитеты ИНС.

Были проведены экспериментальные исследования с многослойной прогнозирующей ИНС, обучающейся в процессе функционирования космического аппарата (либо в режиме модельного времени). Число входов первого слоя $k \cdot n$ соответствует k потокам с различных датчиков за n тактов времени (в самом простом случае мы прогнозируем поведение одного единственного датчика, т. е. $k = 1$). Число нейронов первого и второго слоев выбирается исходя из размера временного окна. Для больших значений n требуется увеличение числа нейронов. Третий слой содержит $k \cdot m$ нейронов. При прогнозировании поведения всех k датчиков на один шаг (временной такт) вперед $m = 1$, при прогнозировании на два шага $m = 2$ и т. д. Более длинный прогноз используется для повышения точности определения сбоя. Если прогноз поведения того или иного датчика существенным образом отличается от полученных с КА данных, это сигнализирует о возможной неисправности оборудования.

В системе «НС Мониторинг» учтен опыт построения инструментальных средств и прикладных интеллектуальных систем [8–15], она обеспечивает:

- модульный характер подключения основных функциональных блоков;
- масштабируемость вычислительной среды на основе процессоров общего назначения и нескольких графических ускорителей (Graphics Processing Unit, GPU) в составе отдельных вычислительных узлов;
- поддержку отказоустойчивости (в случаях отказа некоторых вычислительных узлов) за счет динамического переконфигурирова-

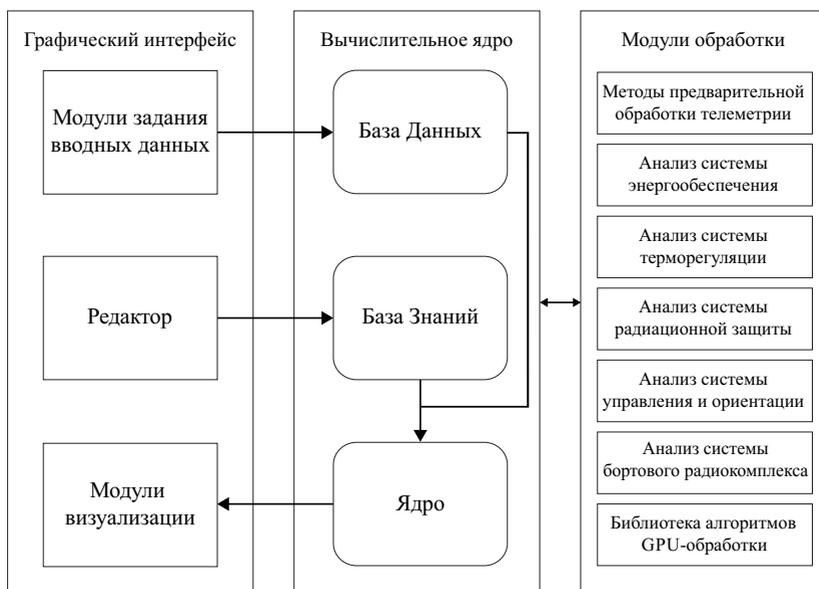


Рис. 2. Архитектура «НС Мониторинг»

ния вычислительной сети;

- возможность легкой адаптации программного комплекса к новым аппаратным и программным платформам;
- создание и редактирование визуальных схем задач обработки информации;
- шифрование на базе нейросетевого алгоритма с обучением на многосимвольных (свыше 1000 символов) алфавитах;
- выявление требуемых характерных особенностей в телеметрических и целевых данных с точностью и полнотой не хуже 85% на основе нейросетевой технологии мониторинга;
- поддержку многопользовательского (облачного) режима функционирования вычислительного ядра.

На рис. 3 показана двухуровневая схема экспериментального образца системы. На схеме приняты следующие обозначения: СБИ — средства бортовых измерений, АС — аномальная ситуация, ТС КА — техническое состояние космического аппарата.

На вход системы подается набор ТМИ, в которой содержатся показания разных датчиков (например, температуры, напряжения,

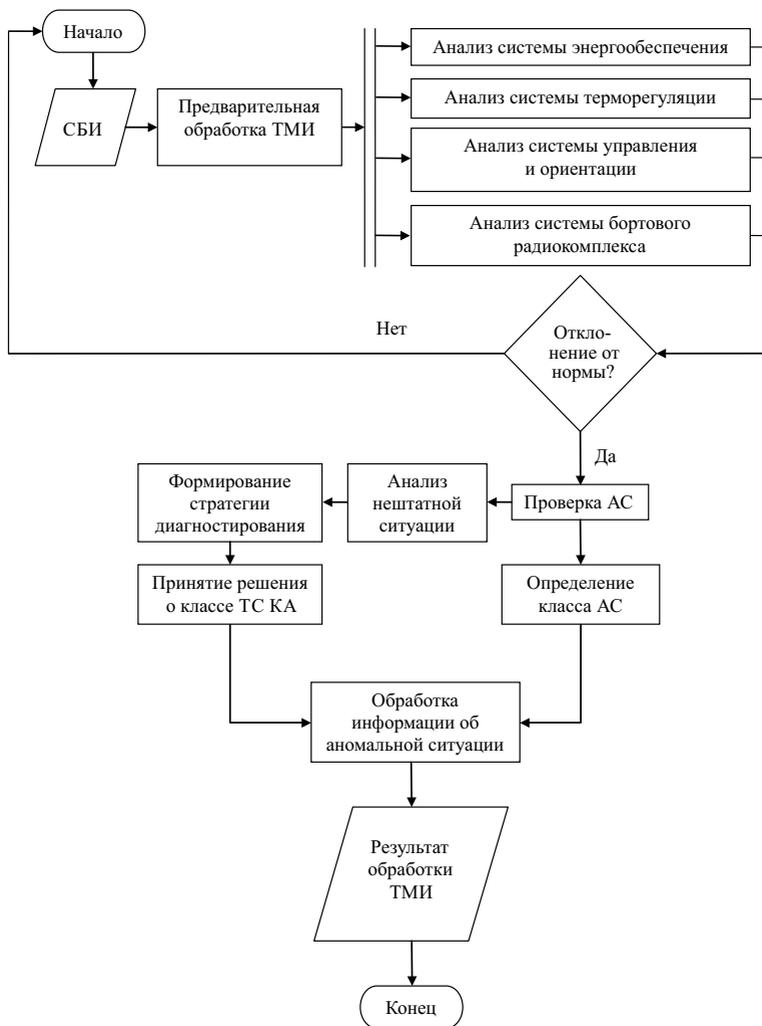


Рис. 3. Функциональная схема системы «НС Мониторинг»

ориентации и т. д.). Обработка телеметрической информации разделена на два этапа. Согласно схеме (см. рис. 3), на первом этапе работает модуль предварительной обработки ТМИ. Полученная после обработки информация в параллельном режиме подается на вход

нескольким модулям анализа подсистем КА. К ним относятся:

- модуль анализа системы энергообеспечения;
- модуль анализа системы терморегуляции;
- модуль анализа системы управления и ориентации КА;
- модуль анализа системы бортового радиокомплекса.

Каждый модуль обрабатывает относящуюся к нему информацию из общего потока ТМИ. Если в результате анализа отклонений от нормальных показателей не обнаруживается, система переходит в начало работы и ожидает следующий блок ТМИ. В случае отклонения от нормы в одном или более подсистемах КА наступает второй этап обработки телеметрии. На этом этапе происходит интеллектуальный анализ полученных данных с помощью ИНС, в частности:

- проверка нештатной (аномальной) ситуации;
- определение класса аварийной ситуации;
- формирование стратегии диагностирования;
- принятие решения о классе ТС КА.

Далее полученное в ходе работы интеллектуальных методов заключение об аномальной ситуации передается оператору для принятия решений. Кроме этого, на данном этапе возможна выработка рекомендаций системой при наличии соответствующей базы знаний.

Заключение

Система «НС Мониторинг» способна решать задачи мониторинга и диагностики состояния подсистем космических аппаратов по телеметрическим данным, осуществлять классификацию обнаруженных неисправностей в режиме, близком к реальному времени. Это достигается за счет принятой модульной архитектуры, возможности конвейерно-параллельной обработки данных, возможности использования высокопроизводительных платформ и использования аппарата нейросетевого анализа. Данная архитектура способна обеспечить решение задач поддержания и продления жизненного цикла космических аппаратов.

Список литературы

- [1] М. Н. Бурдаев, А. Н. Виноградов, В. Ф. Заднепровский, А. В. Захаров, Е. П. Куршев, В. М. Хачумов. «Комплекс программно-инструментальных средств для создания интеллектуальных систем контроля и

- управления объектами аэрокосмического назначения», *Авиакосмическое приборостроение*, 2006, №8, с. 24–33 ↑ 87.
- [2] В. Н. Вагин, А. П. Еремеев, «Базовые принципы конструирования интеллектуальных систем поддержки принятия решений реального времени для мониторинга и управления сложными техническими объектами», *Труды Третьего расширенного семинара «Использование методов искусственного интеллекта и высокопроизводительных вычислений в аэрокосмических исследованиях»* (Переславль-Залесский, 2003), с. 79–97 ↑ 88.
- [3] Ю. Г. Емельянова, «Средства когнитивной графики для отображения и анализа текущего состояния наземных станций командно-измерительных систем», *Труды конференции «Программные системы: теория и приложения»*. Т. 1 (Переславль-Залесский, 2008), с. 104–114 ↑ 88.
- [4] V. Ganchenko, A. Doudkin, A. Inyutin, Y. Marushko, “Neural network software diagnosis system of telemetry data”, *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*. V. 1 (Berlin, 2013), pp. 376–380 (english) ↑ 88, 89.
- [5] M. S. Mousavi. *Neural network-based fault diagnosis of satellites formation flight*, A thesis in The Department of Electrical and Computer Engineering, Canada, 2013 (english), 241 с. ↑ 89.
- [6] Ю. Г. Емельянова, А. А. Талалаев, В. П. Фраленко, В. М. Хачумов, «Нейросетевой метод обнаружения неисправностей в космических подсистемах», *Труды конференции «Программные системы: теория и приложения»*. Т. 1 (Переславль-Залесский, 2009), с. 133–143 ↑ 89.
- [7] Н. С. Абрамов, О. Г. Шишкин, «Архитектура системы мониторинга состояния космического аппарата», *Сборник тезисов Всероссийской конференции (с международным участием) «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем»* (Москва, РУДН, 2015), с. 122–124 ↑ 90.
- [8] Н. С. Абрамов, В. Ф. Заднепровский, А. А. Талалаев, В. П. Фраленко. «Применение искусственных нейронных сетей в задачах контроля и диагностики подсистем космических аппаратов», *Современные проблемы науки и образования*, 2014, №3, URL <http://www.science-education.ru/pdf/2014/3/296.pdf> ↑ 90.
- [9] А. А. Талалаев. «Особенности архитектуры параллельной программной системы распознавания графических образов на основе искусственных нейронных сетей», *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*, 2008, №9, с. 43–52 ↑ 90.
- [10] А. О. Блинов, В. И. Гурман, Е. А. Трушкова, В. П. Фраленко. «Программный комплекс оптимизации законов управления», *Программные продукты и системы*, приложение к международному журналу «Проблемы теории и практики управления», 2 (2009), с. 95–100 ↑ 90.

- [11] В. В. Мажуга, В. М. Хачумов. «Контроль и диагностика технических и биологических систем на основе метода группового учета аргументов», *Искусственный интеллект и принятие решений*, 2009, №4, с. 80–87 ↑ 90.
- [12] А. А. Талалаев. «Организация конвейерно-параллельных вычислений для обработки потоков данных», *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2011, №1, с. 8–13 ↑ 90.
- [13] Ю. Г. Емельянова, А. А. Талалаев. «Сетевые модели функционирования прикладных параллельных систем обработки потоков данных», *Авиакосмическое приборостроение*, 2012, №5, с. 10–19 ↑ 90.
- [14] А. А. Талалаев, В. П. Фраленко. «Архитектура комплекса конвейерно-параллельной обработки данных в гетерогенной вычислительной среде», *Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика*, 2013, №3, с. 113–117 ↑ 90.
- [15] А. А. Талалаев, В. П. Фраленко. «Комплекс инструментальных средств для проектирования нейросетевых прикладных систем», *Научно-технический вестник Поволжья*, 2013, №4, с. 237–243 ↑ 90.

Рекомендовал к публикации

д.т.н., проф. В. М. Хачумов

Об авторах:



Николай Сергеевич Абрамов

К.т.н., научный сотрудник ИЦМС ИПС им. А.К. Айламазяна РАН. Область научных интересов: математические методы синтеза, обработки и анализа изображений и сигналов, искусственный интеллект и принятие решений, интеллектуальный анализ данных и распознавание образов, геометрия.

e-mail: n-say@nsa.pereslavl.ru



Андрей Андреевич Ардентов

Младший научный сотрудник ИЦПУ ИПС им. А.К. Айламазяна РАН, к.т.н. (2012, диссертация на тему «Алгоритмическое и программное обеспечение задач управления и обработки изображений»).

e-mail: aaa@pereslavl.ru



Юлия Геннадиевна Емельянова

Инженер-исследователь ИЦМС ИПС им. А.К. Айламазяна РАН. Область научных интересов: человеко-машинные интерфейсы, когнитивно-графическое отображение информации.

e-mail: tajra@mail.ru



Александр Анатольевич Талалаев

К.т.н., старший научный сотрудник ИЦМС ИПС им. А.К. Айламазяна РАН, автор и один из основных разработчиков программно-инструментального комплекса для организации конвейерно-параллельной обработки данных на мультипроцессорных системах.

e-mail: arts@arts.botik.ru



Виталий Петрович Фраленко

К.т.н., старший научный сотрудник ИЦМС ИПС им. А.К. Айламазяна РАН, автор более 70 публикаций. Область научных интересов: интеллектуальный анализ данных и распознавание образов, искусственный интеллект и принятие решений, параллельные алгоритмы, сетевая безопасность, диагностика сложных технических систем.

e-mail: alarmod@pereslavl.ru

**Олег Гарриевич Шишкин**

Выпускник НОУ ВПО Институт программных систем «УГП имени А.К. Айламазяна» (2015). Область научных интересов: диагностика подсистем космических аппаратов, комбинированные нейронные сети.

e-mail:

shishkinog@mail.ru

Пример ссылки на эту публикацию:

Н. С. Абрамов, А. А. Ардентов и др. «Архитектура системы мониторинга и прогнозирования состояния космического аппарата», *Программные системы: теория и приложения*, 2015, **6**:2(25), с. 85–99.

URL

http://psta.psiras.ru/read/psta2015_2_85-99.pdf

Nikolai Abramov, Andrei Ardentov, Julia Emeljanova, Aleksandr Talalaev, Vitaly Fralenko, Oleg Shishkin. *The architecture of the system for spacecraft state monitoring and forecasting.*

ABSTRACT. The paper presents the general architecture of experimental hardware and software system for spacecraft state monitoring and forecasting. It describes the functional diagram of the intellectual faults control system that can meet the challenges of onboard subsystems monitoring and diagnostics by telemetry data and can classify encountered problems in near-real time. (*In Russian*).

Key Words and Phrases: spacecraft, monitoring, control, architecture, high performance computing, telemetry data, cognitive interface.

References

- [1] M. N. Burdayev, A. N. Vinogradov, V. F. Zadneprovskiy, A. V. Zakharov, Ye. P. Kurshev, V. M. Khachumov. "Complex of software tools for development of the aerospace intellectual control systems", *Aerospace Instrument-Making*, 2006, no.8, pp. 24–33 (in Russian).
- [2] V. N. Vagin, A. P. Yeremeyev, "The basic principles of designing intelligent real-time decision support systems for complex technical objects monitoring and management", *Trudy Tret'yego rasshirennogo seminara "Ispol'zovaniye metodov iskusstvennogo intellekta i vysokoproizvoditel'nykh vychisleniy v aerokosmicheskikh issledovaniyakh"* (Pereslavl'-Zalesskiy, 2003), pp. 79–97 (in Russian).
- [3] Yu. G. Yemel'yanova, "Cognitive graphics tools for ground stations command and measuring systems state visualization and analysis", *Trudy konferentsii "Programmnyye sistemy: teoriya i prilozheniya"*. V. 1 (Pereslavl'-Zalesskiy, 2008), pp. 104–114 (in Russian).
- [4] V. Ganchenko, A. Doudkin, A. Inyutin, Y. Marushko, "Neural network software diagnosis system of telemetry data", *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*. V. 1 (Berlin, 2013), pp. 376–380 (english).
- [5] M. S. Mousavi. *Neural network-based fault diagnosis of satellites formation flight*, A thesis in The Department of Electrical and Computer Engineering, Canada, 2013 (english), 241 p.
- [6] Yu. G. Yemel'yanova, A. A. Talalayev, V. P. Fralenko, V. M. Khachumov, "Neural network method for detecting faults in the space-based subsystems", *Trudy konferentsii "Programmnyye sistemy: teoriya i prilozheniya"*. V. 1 (Pereslavl'-Zalesskiy, 2009), pp. 133–143 (in Russian).
- [7] N. S. Abramov, O. G. Shishkin, "The architecture of spacecraft monitoring system", *Sbornik tezisev Vserossiyskoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiyem) "Informatsionno-telekommunikatsionnyye tekhnologii i matematicheskoye modelirovaniye vysokotekhnologichnykh sistem"* (Moskva, RUDN, 2015), pp. 122–124 (in Russian).

© N. S. ABRAMOV^[1], A. A. ARDENTOV^[2], J. G. EMEJANOVA^[3], A. A. TALALAEV^[4], V. P. FRALENKO^[5], O. G. SHISHKIN^[6] 2015

© AILAMAZYAN PROGRAM SYSTEM INSTITUTE OF RAS^[1, 2, 3, 4, 5] 2015

© "EXPO-THERMO"^[6] 2015

© PROGRAM SYSTEMS: THEORY AND APPLICATIONS, 2015

- [8] N. S. Abramov, V. F. Zadneprovskiy, A. A. Talalaye, V. P. Fralenko. "Application of artificial neural networks in spacecraft subsystems control and diagnosis problems", *Modern problems of science and education*, 2014, no.3 (in Russian), URL <http://www.science-education.ru/pdf/2014/3/296.pdf>.
- [9] A. A. Talalaye. "Features of architecture of parallel program system of image recognition on the basis of artificial neural networks", *Neyrokompyutery: razrabotka, primeneniye*, 2008, no.9, pp. 43–52 (in Russian).
- [10] A. O. Blinov, V. I. Gurman, Ye. A. Trushkova, V. P. Fralenko. "The software package to optimize control laws", *Programmnyye produkty i sistemy, prilozheniye k mezhdunarodnomu zhurnalu "Problemy teorii i praktiki upravleniya"*, 2 (2009), pp. 95–100 (in Russian).
- [11] V. V. Mazhuga, V. M. Khachumov. "Control and diagnostics of technical and biological systems on the basis of data handling group method", *Artificial intelligence and decision making*, 2009, no.4, pp. 80–87 (in Russian).
- [12] A. A. Talalaye. "Parallel-pipeline computations for data flows processing", *Informatsionnyye tekhnologii i vychislitel'nyye sistemy*, 2011, no.1, pp. 8–13 (in Russian).
- [13] Yu. G. Yemel'yanova, A. A. Talalaye. "The network models of applied parallel systems functioning for data flow processing", *Aerospace Instrument-Making*, 2012, no.5, pp. 10–19 (in Russian).
- [14] A. A. Talalaye, V. P. Fralenko. "The architecture of a parallel-pipeline data processing complex for heterogeneous computing environment", *Vestnik RUDN. Seriya Matematika. Informatika. Fizika*, 2013, no.3, pp. 113–117 (in Russian).
- [15] A. A. Talalaye, V. P. Fralenko. "The instrumental tools complex for design an applied systems based on neural networks", *Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2013, no.4, pp. 237–243 (in Russian).

Sample citation of this publication:

Nikolai Abramov, Andrei Ardentov, Julia Emeljanova, Aleksandr Talalae, Vitaly Fralenko, Oleg Shishkin. "The architecture of the system for spacecraft state monitoring and forecasting", *Program systems: theory and applications*, 2015, 6:2(25), pp. 85–99. (In Russian.) URL http://psta.psiras.ru/read/psta2015_2_85-99.pdf