

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС

THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS

УДК 004.5; 629.786

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ И СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ, РЕГИСТРАЦИИ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА РОССИЙСКОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ

М.М. Лаврентьев, В.П. Хрипунов, К.Ф. Лысаков, М.Ю. Шадрин

Чл.-корр. РАН, докт. физ.-мат. наук, проф. М.М. Лаврентьев;
канд. техн. наук, доц. К.Ф. Лысаков; М.Ю. Шадрин
(Институт автоматики и электрометрии СО РАН)
Канд. техн. наук, доц. В.П. Хрипунов
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье рассматриваются основные принципы создания системы обработки, регистрации и информационной поддержки тренажерного комплекса Российской орбитальной станции. Проведена оценка параметров оборудования и пропускной способности каналов связи для исследования возможности проведения одновременных тренировок космонавтов на нескольких тренажерных системах.

Ключевые слова: технические средства подготовки космонавтов, информационная поддержка, система обработки и регистрации

Development Principles and Structure of the Data Processing, Recording and Information Support System for the Russian Orbital Station Training Complex. M.M. Lavrentiev, V.P. Khripunov, K.F. Lysakov, M.Yu. Shadrin

The article discusses the fundamental principles of developing a system for data processing, data recording and information support for the cosmonaut training complex of the Russian Orbital Station. An assessment of equipment parameters and communication channel bandwidth was carried out to study the possibility of conducting simultaneous cosmonaut training sessions using several simulators.

Keywords: cosmonaut training facilities, information support, data processing and recording system

Одной из характерных особенностей современного этапа эксплуатации технических средств подготовки космонавтов (ТСПК) является необходимость анализа большого объема различного вида информации, получаемой в ходе тренировочного процесса. Для обеспечения процесса тренировки необходимо в режиме реального времени обрабатывать и отображать инструкторскому составу, а также инженерно-техническому персоналу (ИТП), обеспечивающему функционирование тренажеров (операторам тренажеров), несколько каналов аудиовизуальной информации, а также контролировать многочисленные параметры, характеризующие функционирование систем тренажеров [1]. Разработку перспективных тренажерных комплексов целесообразно осуществлять на базе единой модульной архитектуры системы обработки, регистрации и их информационной поддержки.

Разрабатываемый тренажерный комплекс модулей Российской орбитальной станции (ТК М РОС) будет представлять собой совокупность логически связанных и интегрированных в единую информационно-моделирующую среду современных унифицированных аппаратных и программных средств коллективного пользования для решения спектра функциональных задач подготовки космонавтов по РОС. Наличие человеко-машинных звеньев делают особо актуальной потребность интерактивной связи оператора тренажера с системой контроля в процессе эксплуатации. Поэтому исследование вопросов автоматизации процесса контроля и управления системами ТК М РОС является одним из перспективных направлений применения инновационных интеллектуальных технологий контроля и диагностики состояния его систем, обеспечивающих качественно новые возможности обработки и представления информации операторам [2]. Текущий уровень развития вычислительной техники и информационных технологий, разработка автоматизированных онлайн средств контроля и диагностики составных частей тренажерного комплекса делает возможным решение данной технической задачи.

Кроме того, современные условия эксплуатации космических тренажеров показывают острую необходимость включения в состав тренажерных систем автоматизированных средств для контроля состояния тренируемых, а также выявления отклонений в процессе работы, оперативного поиска неисправности и восстановления в кратчайшие сроки работоспособности космических тренажеров. Используемый на тренажерах способ эксплуатации «по состоянию» вызывает необходимость создания алгоритмов обработки статистической информации, получаемой от датчиков аппаратных средств тренажера, с целью выдачи рациональных, с точки зрения своевременности, и правильных рекомендаций ИТП по поиску и устранению неисправностей [3].

Зачастую процесс принятия решений ИТП по устранению (локализации) возникающих в ходе тренировок неисправностей тренажеров требует

быстрого и качественного анализа большого объема имеющихся данных, иногда в условиях неполной информации. При этом проведение такого анализа на достаточно адекватном уровне ИТП (особенно с малым опытом эксплуатации) самостоятельно, без внешней поддержки, в условиях, связанных с дефицитом времени и психологической напряженностью тренировочного процесса космонавтов, представляет собой достаточно сложную задачу. К числу основных особенностей, характеризующих интеллектуальную деятельность ИТП в ходе выработки управляющих решений в процессе обеспечения тренировок, относятся следующие:

- преобладание логических схем рассуждений над расчетными;
- многофакторность условий принятия решений;
- сложность установления функциональных зависимостей между рядом анализируемых параметров;
- психофизиологическая напряженность в условиях многообразия стресс-факторов и дефицита времени;
- одновременное проведение нескольких независимых тренировок на различных частях ТК М РОС.

Комплексный характер факторов, сопровождающих в ходе проведения тренировок появление неисправностей на тренажерах модулей РОС, многообразие аппаратных и программных средств тренажеров, а также сложность поиска вариантов выхода из возникающих ситуаций при ограниченных резервах времени на разработку рекомендаций для исключения срыва тренировки, требуют привлечения специализированных средств диагностики и контроля, адаптируемых к различным системам.

В качестве основных принципов создания тренажерного комплекса РОС в работе предлагаются модульность (обеспечивает возможность оперативного совершенствования отдельных систем ТК М РОС и наращивания его функционала без приостановки процессов подготовки) и использование элементов искусственного интеллекта для обеспечения качественной информационной поддержки ИТП (операторов ТК М РОС), обеспечивающего функционирование тренажеров. Центральную роль должно играть алгоритмическое обеспечение поддержки принятия решений в процессе проведения тренировок.

Под алгоритмическим обеспечением поддержки принятия решений ИТП будем понимать совокупность методов, моделей и алгоритмов, позволяющих моделировать логику рассуждений опытного оператора при выработке решений, осуществлять обработку и преобразование информации о состоянии систем тренажерного комплекса в управляющие решения. Данные методы, модели и алгоритмы составляют основу алгоритмического обеспечения поддержки принятия решений, определяют облик так называемого расчетного аппарата для получения решений по управлению, устанавливают содержание процедур, реализующих этот аппарат.

Модульный принцип построения системы обработки, регистрации и информационной поддержки

Модульный принцип построения системы обработки, регистрации и информационной поддержки (СОРИП) ТК М РОС позволяет масштабировать систему под изменяющиеся задачи и эффективно использовать существующие ресурсы СОРИП для решения различных задач, в том числе для одновременного проведения нескольких независимых тренировок на различных частях ТК М РОС. Традиционно СОРИП включает следующие функциональные модули:

- захвата видео с камер наблюдения;
- захвата видео с компьютерного генератора изображений (КГИ);
- захвата/приема сообщений от внешних источников информации (датчики работоспособности оборудования, команды управления и подобное);
- передачи видео;
- сжатия видео;
- хранения сжатого видео;
- воспроизведения записанного ранее видео;
- информационной поддержки проведения тренировок;
- отображения визуальной информации, поступающей с модуля захвата и воспроизведения;
- управления текущей структурой отображения визуальной информации;
- обработки данных.



Блок-схема модульного построения системы обработки, регистрации и информационной поддержки тренажерного комплекса РОС

Указанные модули, несмотря на свою кажущуюся независимость, должны быть связаны между собой каналами передачи информации, обеспечивающими отклик системы на действия космонавта практически в режиме поступления данных, то есть в режиме реального времени.

Далее описаны технические характеристики аппаратных средств для обеспечения работы ключевых функциональных модулей.

Процессы ввода и вывода видео

В материнских платах с набором микросхем компании Intel платы ввода видео подключаются через «южный мост», имеющий канал общения «центральный процессор – память» пропускной способностью от 7,9 до 15,8 Гбит/с (зависит от типа набора микросхем). Количество каналов ввода видео ограничено до ~ 16–32 каналов 3G-SDI или 4–8 каналов 12G-SDI независимо от количества PCIe слотов.

В наборах микросхем компании AMD слоты PCIe для плат ввода видео подключаются напрямую к ЦП/памяти, количество каналов ввода видео ограничивается количеством линий PCIe у центрального процессора (128) и количеством слотов PCIe в конкретной реализации: до 256 каналов 3G-SDI или до 64 каналов 12G-SDI [4]. Количество вводимых каналов видео будет ограничиваться производительностью ЦП.

Поскольку у процессоров Intel и AMD слот под графический акселератор подключен напрямую к процессору (без «южного» моста), то ограничений по выводу видеоданных нет.

Компрессия (сжатие) данных

Для оперативной компрессии видео используется формат сжатия MPEG2 I-frame. Для компрессии одного канала видео 3G-SDI достаточно одного ядра центрального процессора (ЦП) с частотой работы 3 ГГц. Получаемый компрессированный поток – 20 Мб/с (82 Гб/ч). Для компрессии одного канала видео 12G-SDI требуется 4 ядра ЦП с частотой 3 ГГц. Получаемый компрессированный поток – 50 Мб/с (180 Гб/ч).

Передача видео

Рассмотрим современные средства передачи видео: использование универсальной или специализированной инфраструктуры для передачи видео.

Современным стандартом передачи видео через специализированную инфраструктуру является серия стандартов SDI SMPTE-259M и SMPTE-2083. Это надежные и проверенные временем стандарты, гарантирующие работу конкретной конфигурации практически без ограничений по времени эксплуатации, на расстояниях, достаточных для построения СОРИП ТК М РОС. Однако практически любая серьезная модификация системы потребует

переделки инфраструктуры, например прокладки дополнительных кабелей, что не позволит сделать однозначный выбор в пользу этого стандарта.

Среди современных стандартов универсальной передачи видео через IP-сети стоит выделить два: SMPTE-2110 и NDI [4, 5].

NDI – это коммерческий протокол, функционирующий как стандарт, разрешенный для свободного использования. NDI позволяет использовать стандартные сети Ethernet для передачи видео, звука и метаданных. Данные передаются в сжатом видео, что позволяет удешевить инфраструктуру. Например, в сети 1G Ethernet можно передавать потоки данных с 4–5 камер с разрешением 1920×1080 . Недостатком NDI является его закрытость и непрозрачность. Например, при использовании множества экземпляров NDI-оборудования в одной сети предприятия регулярно возникают проблемы с доступностью этого оборудования в разных точках сети.

SMPTE-2110 – это открытое семейство стандартов для передачи видео-, аудио- и метаданных с поддержкой точного времени по протоколу RTP. Он поддерживает как передачу несжатого видео, так и передачу видео, сжатого кодеком JPEG-XS. По сравнению с NDI он требует в разы большей пропускной способности сети, если используется несжатое видео. При использовании сжатия видео, его эффективность становится сравнимой с NDI. Также в сетях с поддержкой SMPTE-2110 можно использовать для передачи сжатого видео стандарт SMPTE-2022/6, накладывающего меньше ограничений на совместимость оборудования.

Инфраструктура передачи видео, построенная на SMPTE-2110, вероятно будет более дорогой по сравнению с использованием NDI, однако она обеспечивает гибкость конфигурирования системы для решения новых задач, возникающих в процессе эксплуатации уже построенной системы. Например, не меняя инфраструктуру можно относительно просто перемещать системы захвата видео, изменять формат видео, добавлять различные метаданные и даже добавлять новые источники видеосигнала в рамках существующей пропускной способности сети.

Программно-аппаратные части модулей СОРИП могут располагаться территориально в разных местах:

- захвата видео – непосредственно на тренажере;
- захвата данных от внешних источников – в местах интеграции с этими источниками;
- отображения визуальной информации – в местах работы членов комиссии;
- хранения сжатого видео и системы информационной поддержки проведения тренировок – в модуле обработки данных (МОД).

Модуль передачи видео является связующей инфраструктурой СОРИП.

Ключевым вопросом является место расположения модуля сжатия видео. Если он расположен в непосредственной близости от систем захвата видео, то по IP-сетям передается сжатое видео, что позволяет существенно

снизить требования к пропускной способности инфраструктуры СОРИП. При размещении систем сжатия видео в ЦОД, можно агрегировать в одно место несколько кодеров, сильно сокращая стоимость системы кодирования и повышая ее надежность за счет резервирования. Компромиссным вариантом является размещение кодеров для всех камер одного тренажера в одном месте в непосредственной близости от конкретного тренажера. В этом случае появляется возможность расположить в одном месте достаточно большое число кодеров (для всех камер одного тренажера), чтобы частичное резервирование системы кодирования оставалось экономически эффективным.

Обработка данных

МОД включает в себя компьютерные мощности, используемые для решения следующих задач:

- хранение сжатого видео, при этом возможно перекодирование видео для долговременного хранения с целью уменьшения занимаемого объема;
- декодирование и воспроизведение ранее записанного видео;
- анализ поступающего видео с целью выявления в нем определенных ранее событий;
- анализ потока событий, в том числе событий, характеризующих состояние хода тренировки (например, возникновение нештатных ситуаций).

При этом анализ данных можно разделить на две части: анализ потока видео (последовательности изображений) и анализ внешних событий.

Для анализа последовательности изображений можно использовать различные алгоритмы и программы, включая методы искусственного интеллекта. Например, для любой камеры можно настроить анализ появления в заданном месте лица человека. Соответственно, при появлении лица в камере сгенерируется переход состояния конкретного события из неактивного в активное, а при исчезновении – обратный переход (из активного в неактивное).

Для анализа событий имеет смысл использовать связку протокола передачи сообщений с описанием набора конечных автоматов (Finite State Machine), иерархических конечных автоматов (Hierarchical Finite State Machine) и деревьев поведения (Behavior Tree). В качестве протокола передачи сообщений удобно использовать проверенное временем решение – протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Для описания конечных автоматов и деревьев поведения можно использовать одну из библиотек на современных языках программирования высокого уровня, таких как JavaScript, Python, Go. Соответственно, система СОРИП должна поддерживать обработку таких скриптов и их интеграцию с подсистемой приема и передачи сообщений. Все события должны записываться в модуле хранения (вместе со сжатым видео и звуком).

В описании конечного автомата (дерева поведения) указываются те события, на которые должен реагировать автомат, при этом автомат сам хранит

текущее состояние и при переходе в нужные состояния он сам формирует новые управляющие события.

Обработка событий не занимает много ресурсов, поэтому ее сложность можно наращивать в ходе эксплуатации системы. При этом надежность работы протокола MQTT и независимость исполнения скриптов с конечными автоматами и деревьями поведения позволяют сохранять работоспособность системы в целом даже при внесении ошибок в описание конкретного конечного автомата (некорректно описанный автомат работать не будет, но все другие продолжают работу независимо от него). Поэтому конфигурация системы должна обеспечивать возможность изменения конфигурации конечных автоматов, включая добавление новых конечных автоматов и деревьев поведения.

Выводы

Предлагается модульная система построения СОРИП, позволяющая как масштабировать систему под изменяющиеся технические и функциональные требования, так и эффективно использовать существующие ресурсы СОРИП для решения различных задач, в том числе для одновременного проведения нескольких независимых тренировок на различных частях ТК М РОС.

Для оценки пропускной способности брались следующие характерные потоки данных:

- до 12 Гбит/с – для видеопотоков по интерфейсам SDI/HDMI;
- 100 Мб/с – для сжатого видео;
- 1 Мбит/с – для потока управления.

Таким образом, общая пропускная способность системы при обработке N_HD каналов с разрешением FullHD (1920×1080) и N_4K каналов с разрешением 4K (3640×2160) определяется в соответствии с выражением:

$$N_HD \times 3 \text{ Гбит/с} + N_4K \times 12 \text{ Гбит/с} + N_HD \times 20 \text{ Мб/с} + N_4 \times 100 \text{ Мб/с}.$$

При этом количество физических ядер процессора N_CPU для компрессирования видео в режиме реального времени должно быть не менее, чем значение $N_HD + 4 \times N_4K$.

Объем хранилища V_D в Мб для одной тренировки ($T_тренировки/с$) оценивается по следующей формуле:

$$V_D = (N_HD \times 20 + N_4K \times 100) \times T_тренировки.$$

Предлагаемая модульная система СОРИП была протестирована для двух каналов с разрешением 4K и 8 каналов с разрешением FullHD. При этом обрабатываемый суммарный поток данных порядка 51 Гбит/с был успешно обработан на 16-ядерном процессоре Intel Core i7 13700KF в режиме реального времени. Объем хранилища для 10-минутной тренировки составил 211 Гб.

В качестве основных принципов создания системы обработки, регистрации и информационной поддержки операторов тренажерного комплекса Российской орбитальной станции разработана блок-схема модульного построения системы и проведена оценка основных параметров оборудования и каналов связи, демонстрирующая возможность ее реализации на стандартном аппаратном обеспечении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Честнов, А.А. Использование современных технологий при создании тренажера для космонавтов / А.А. Честнов, В.В. Егоров, В.В. Полянский // Союз машиностроителей России. Национальная научно-техническая конференция, 2023. – С. 37–42. – DOI: 10.24412/CL-35807-2023-1-37-42.
2. Васильев, В.И. Основы создания и совершенствования технических средств подготовки космонавтов к выполнению научно-прикладных исследований и экспериментов на РС МКС / В.И. Васильев, Е.В. Попова, П.А. Сабуров // Пилотируемые полеты в космос. – 2020. – № 1(34). – С. 72–85.
3. Брагин, В.И. Учет опыта создания и современных тенденций развития телевизионных систем при разработке комплексного тренажера пилотируемого транспортного корабля / В.И. Брагин, А.В. Пекарский, В.В. Пятков // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – № 4(49). – С. 42–57.
4. SMPTE ST 2110. Professional Media over Managed IP Networks // SMPTE: [website]. – URL: <https://www.smpte.org/standards/st2110> (дата обращения 22.07.2026).
5. Removing the Limits of Video // NDI: [website]. – URL: <https://ndi.video/9> (дата обращения 22.07.2026).

REFERENCES

1. Chestnov, A.A. The Use of Modern Technologies in the Development of a Cosmonaut Training Simulator. Russian Engineering Union / A.A. Chestnov, V.V. Egorov, V.V. Polyansky // National Scientific and Technical Conference, 2023. – P. 42–57. – DOI: 10.24412/CL-35807-2023-1-37-42.
2. Vasilyev, V.I. Fundamentals of Creation and Improvement of Technical Cosmonaut Training Facilities for Scientific and Applied Research and Experiments on the Russian Segment of the ISS / V.I. Vasilyev, E.V. Popova, P.A. Saburov // Manned Spaceflight. – 2020. – No 1. – P. 72–85. – DOI: 10.34131/MSF.20.1.72-85.
3. Bragin, V.I. Incorporating Development Experience and Modern TV Systems Evolution Trends into Designing an Integrated Manned Transport Spacecraft Simulator / V.I. Bragin, A.V. Pekarsky, V.V. Pyatkov // Manned Spaceflight. – 2023. – No 4(49). – P. 42–57.
4. SMPTE ST 2110. Professional Media over Managed IP Networks // SMPTE: [website]. – URL: <https://www.smpte.org/standards/st2110> (access date: 22.07.2026).
5. Removing the Limits of Video // NDI: [website]. – URL: <https://ndi.video/9> (access date: 22.07.2026).