

Динамическая реконфигурация бортовой распределенной информационно-вычислительной среды на базе ОСРВ JetOS

А. М. Соловьёв¹, E-mail: darkzite@yandex.ru,
М. Е. Семёнов², Н. И. Сельвесюк³, В. М. Новиков³, Е. А. Карпов⁴

¹АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж

²ВУНЦ ВВС «ВВА», г. Воронеж

³ФГУП «ГосНИИАС», г. Москва

⁴Воронежский государственный университет, г. Воронеж

Аннотация. Представленная в настоящей работе математическая модель и алгоритмическое обеспечение для решения задачи динамической реконфигурации бортовой распределенной информационно-вычислительной среды реализуются в совокупности программных средств, объединенных в единую интеллектуальную систему с элементами искусственного интеллекта и машинного обучения, базирующуюся на прецедентном и нейросетевом подходах. При этом, в качестве «прецедентов» принимается опыт квалифицированных пилотов, описывающий действия по парированию отказов за счет динамической реконфигурации комплекса бортового оборудования, позволившие в результате успешно завершить полетное задание, а также набор датасетов, полученный с помощью моделирования нештатных ситуаций на цифровых двойниках бортовой вычислительной сети и оборудования воздушного судна. В работе рассматривается специфика реализации интеллектуальной системы как части операционной системы реального времени JetOS, работающей в соответствии со стандартом ARINC 653.

Ключевые слова: Полностью оптическая бортовая сеть, интеллектуальная система, интегрированная модульная авионика, комплекс бортового оборудования, прецедентный подход, нейросетевой подход

Введение

Современные системы авионики представляют собой сложную распределенную вычислительную среду, которая должна обеспечивать решение широкого спектра задач, при этом удовлетворять строгим требованиям авиационной безопасности, таким как надежность, отказоустойчивость и проч. Наиболее сложным и ответственным

компонентом такой системы является бортовая распределенная информационно-вычислительная среда (БРИВС), обеспечивающая функционирование приложений, реализующих диагностику и управление системами воздушного судна [1].

Одной из актуальных проблем, возникающих при построении современных БРИВС, является проблема конструирования интеллектуальных систем реального времени, ориентированных на открытые и динамические предметные области. В основе таких систем лежит интеграция способных к адаптации, модификации и обучению моделей представления и оперирования знаниями, ориентированных на специфику проблемной (предметной) области и соответствующий тип неопределенности, что отражает их способность к развитию и изменению своего состояния [2,3]. Одним из наиболее перспективных подходов к повышению требований авиационной безопасности современных комплексов бортового оборудования (КБО) является построение динамически реконфигурируемых систем авионики, позволяющих успешно парировать возникающие в процессе выполнения полетного задания отказы (как на аппаратном, так и на программном уровне) посредством перераспределения вычислительных ресурсов и изменения структуры БРИВС в реальном масштабе времени. Таким образом, разработка и внедрение авиационных систем, позволяющих реализовывать интеллектуальный анализ состояния КБО в реальном масштабе времени, производить прогнозирование отказов и, в случае возникновения нештатных ситуаций, инициировать и выполнять динамическую реконфигурацию КБО, является важной и перспективной задачей.

Критически важными характеристиками БРИВС, необходимыми для развертывания интеллектуальной системы, обеспечивающей поддержку процесса динамической реконфигурации, являются: однородность элементов вычислительной среды, ее масштабируемость, параллелизм и детерминизм процессов, обеспечивающих ее функционирование, минимальные временные задержки. В качестве наиболее оптимальной платформы для реализации интеллектуальной системы поддержки, позволяющей выполнять динамическую реконфигурацию КБО в реальном масштабе времени, была выбрана платформа, построенная на базе полностью оптической бортовой среды (ПОБС), как обладающая наилучшими перечисленными выше характеристиками [4,5].

В силу того, что интеллектуальная система должна быть развернута в БРИВС не только на аппаратном, но и на прикладном уровне, целесообразно использовать существующие авиационные стандарты,

регламентирующие временное и пространственное разделение ресурсов вычислительных модулей (ВМ) БРИВС в соответствии с принципами интегрированной модульной авионики (ИМА). Одним из таких стандартов является ARINC 653. В представленной работе рассматриваются подходы к построению и развертыванию на прикладном уровне интеллектуальной системы динамической реконфигурации (ИСДР) КБО в операционной системе реального времени (ОСРВ) JetOS, являющейся отечественной сертифицируемой бортовой операционной системой, работающей в соответствии со стандартом ARINC 653.

1. Модель БРИВС

Для построения ИСДР, являющейся, по сути, программной надстройкой над сервисами ОСРВ JetOS, была разработана математическая модель, однозначно описывающая функционал БРИВС на всех уровнях, подлежащих мониторингу и администрированию в процессе интеллектуальной поддержки. Модель БРИВС состоит из подуровней, описывающих

- оптическую коммуникационную среду (\mathbf{M}^{opt}),
 - информационное сопряжение между основными функциональными задачами (ФЗ), реализующимися на всех ВМ БРИВС (\mathbf{M}^{func}),
 - информационное сопряжение между ВМ БРИВС (\mathbf{M}^{cpu}),
 - распределение имеющихся вычислительных ресурсов и затрат по всем ВМ БРИВС, а также параметры конфигурации КБО в целом (\mathbf{V}^{cpu}),
- где \mathbf{M}^{opt} , \mathbf{M}^{func} и \mathbf{M}^{cpu} – формализация соответствующего подуровня в виде матрицы инцидентности подграфа, а \mathbf{V}^{cpu} – вектор параметров архитектуры КБО.

Таким образом, формализовать модель можно в виде специального функционального графа \mathbf{M}^{sfg} (СФГ), состоящего из подграфов каждого подуровня

$$\mathbf{M}^{sfg} = \mathbf{M}^{opt} \cup \mathbf{M}^{func} \cup \mathbf{M}^{cpu}, \quad (1)$$

объединенных между собой, как показано на рис. 1.

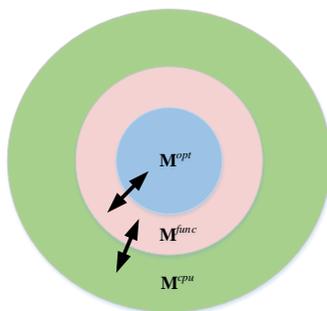


Рис. 1. Структура СФГ

В настоящей работе предлагается алгоритм динамической реконфигурации КБО, основанный на прецедентном подходе. Данный подход подразумевает, что существует априорная информация («прецеденты») об отказных ситуациях и способах их решений методом динамической реконфигурации, на основе которой формируется база знаний (БЗ). Таким образом, БЗ представляет собой перечень заранее проверенных возможных рабочих конфигураций КБО на базе ПОБС. При этом каждый вычислитель сети, среди прочих, имеет специальное программное приложение, супервизор, осуществляющее анализ состояния сети и ведущее постоянный обмен с аналогичными программными приложениями других вычислителей. При этом среди всех имеющихся в сети супервизоров только один является ведущим (роль ведущего может меняться в зависимости от ситуации). В случае возникновения отказа (отказ приложения, приемного или передающего оптического канала и др., в соответствии с ARINC 653P1-3) ведущий супервизор, на основе имеющейся у него информации о состоянии КБО, производит поиск в БЗ конфигурации («прецедента»), позволяющей нивелировать данный отказ и являющейся наиболее подходящей по набору критериев. Если «прецедент» был найден, ведущий супервизор производит реконфигурацию всей сети. В случае отсутствия соответствующего «прецедента» в БЗ, ведущий супервизор производит синтез новой конфигурации, позволяющей нивелировать отказ и, с согласия пилота, производит реконфигурацию.

Таким образом, основным элементом ИСДР, влияющим на эффективность интеллектуального вывода, является БЗ. Структура базы знаний, в терминах разработанной модели представлена на рис 2.

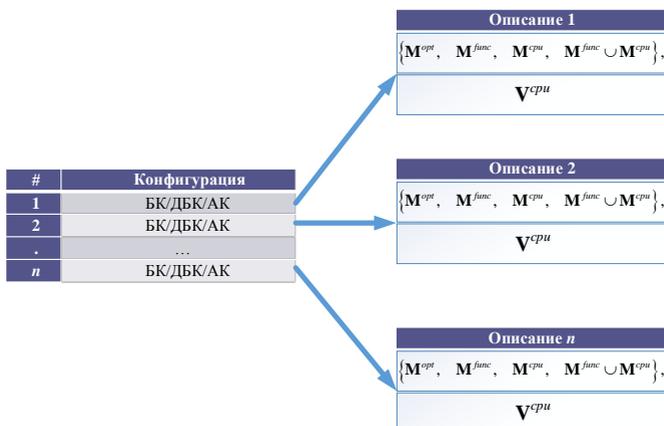


Рис. 2. Структура БЗ

Как показано на рис. 2, БЗ содержит перечень конфигураций КБО трех типов, а именно, БК – базовые конфигурации, представляющие собой набор независимых полнофункциональных конфигураций КБО, ДБК – декомпозиции базовых конфигураций, отличающиеся от БК перераспределением ФЗ по ВМ БРИВС и АК – аварийные конфигурации, являющиеся версиями ДБК с урезанным функционалом (отключен определенный набор ФЗ, не являющихся критически важными для успешного выполнения полетного задания).

Элементом БРИВС, в котором непосредственно производится мониторинг текущей ситуации и интеллектуальный вывод, является сетевой супервизор. Данная ФЗ объединяет в себе набор подходов, позволяющих производить как быстрый поиск по БЗ, так и выполнять интеллектуальный анализ текущей ситуации, включая прогнозирование отказов на основе мониторинговой информации в реальном масштабе времени. При этом основным подходом, значительно повышающим эффективность и гибкость работы супервизора, является нейросетевой подход. В рамках данного подхода производится первичная обработка и структурирование БЗ (с использованием нейросетевого энкодера), выполняется прогнозирование отказных ситуаций (с применением глубокой нейросети, обученной на датасете, сформированном на основе экспериментов с цифровыми двойниками КБО ВС), осуществляется синтез новой конфигурации или восстановление логических связей между ФЗ БРИВС в случае отсутствия подходящей конфигурации в БЗ (с применением рекуррентных нейросетей), реализуется быстрый поиск

по БЗ (с применением нейросетей прямого распространения) и т.п. Отметим, что для увеличения производительности интеллектуальной системы возможно реализовать нейросетевой вычислитель аппаратно, на базе ПЛИС [6] или специализированного процессора.

2. Реализация интеллектуальной системы в ОСРВ JetOS

Рассмотрим особенности реализации ИСДР в ОСРВ JetOS. В ядро JetOS входит специальный системный процесс, называемый Health Monitor (HM), обладающий максимальным приоритетом выполнения, осуществляющий мониторинг и парирование отказов за счет приостановки/перезапуска отказавшего программного приложения (раздела, процесса, канала и проч.). При этом, ОСРВ JetOS функционирует независимо на каждом ВМ БРИВС и, в силу требований стандарта ARINC 653, программные модули ОСРВ (включая HM), а также каждый ее экземпляр являются независимыми и изолированными друг от друга, то есть встроенными средствами JetOS невозможно оценить состояние КБО в целом, как единой системы и, вследствие этого, невозможно организовать процесс динамической реконфигурации. Для построения КБО с возможностью динамической реконфигурации необходимо реализовать интеллектуальную систему как дополнительную программную надстройку, позволяющую объединить работу всех HM БРИВС и выполнять интеллектуальный вывод на основе агрегируемых ими данных. При этом такая система, исходя из требований совместимости с ОСРВ, должна оперировать терминами и категориями, характерными для JetOS. Так как HM JetOS обладает наивысшим приоритетом, при развертывании ИСДР неизбежно возникает множество центров управления – HM JetOS каждого вычислителя БРИВС и диспетчер самой интеллектуальной системы.

Таким образом, исходя из особенностей функционирования ОСРВ JetOS и представленной в работе ИСДР, сформируем комплекс требований к принципам функционирования интеллектуальной системы на базе ОСРВ JetOS:

- функционирование ИСДР в части администрирования КБО не должно пересекаться с работой HM JetOS, так как в противном случае это вызовет коллизии в процессе реконфигурации;
- анализ мониторинговой информации в ИСДР должен осуществляться на основе объединенной информации от HM всех вычислительных модулей БРИВС;
- для быстрого поиска и интеллектуального вывода в ИСДР целесообразно использовать нейросетевой вычислитель, обученный на априорном датасете, данные в котором имеют структуру и состав, аналогичный мониторинговым данным от HM JetOS;

- интеллектуальный вывод в ИСДР должен быть детерминированным и опираться на БЗ с заранее регламентированными и апробированными данными.

В силу того, что ИСДР и НМ делят между собой функции мониторинга и администрирования КБО, функции должны осуществляться на разных уровнях абстракции. При этом за НМ JetOS должен быть закреплён следующий низкоуровневый функционал:

- мониторинг состояния вычислительного модуля, на котором запущен данный НМ, а также его разделов, процессов и каналов связи;

- приостановка или перезапуск отказавшего элемента из перечня мониторинга в соответствии с заранее созданной таблицей реакций, содержащей виды отказов и реакцию на них НМ в данном вычислительном модуле.

За ИСДР должен быть закреплён следующий высокоуровневый функционал:

- мониторинг целостности и корректности информационных обменов между всеми вычислительными модулями в БРИВС;

- поиск подходящего решения (новой конфигурации) в случае выявления отказа на данном уровне (т.е. интеллектуальный вывод);

- реализация процесса динамической реконфигурации в соответствии с найденным решением.

Точкой пересечения уровней НМ и ИСДР является раздел (партиционный проект) ОСПВ JetOS. Все программные элементы, находящиеся ниже раздела в иерархии JetOS администрируются средствами НМ, программные элементы, от раздела и выше администрируются ИСДР. При этом в ИСДР при анализе целостности и корректности информационных обменов используется информация о состоянии разделов от НМ каждого вычислительного модуля БРИВС. Структура динамически реконфигурируемой БРИВС на базе JetOS приведена на рис. 3.

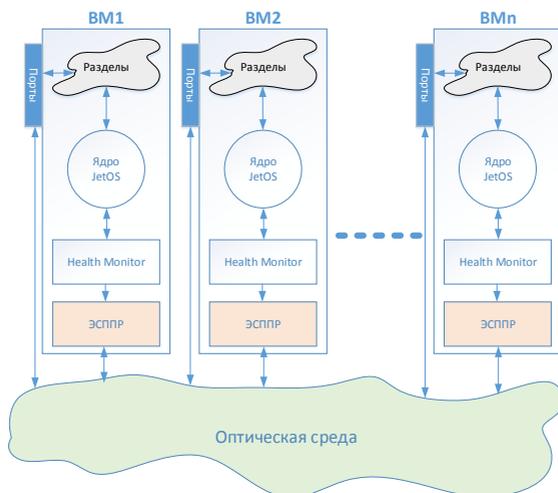


Рис. 3. Структура БРИВС с ИСДР на базе JetOS

Заключение

Выделим основные преимущества и недостатки использования ОСРВ JetOS (и других ОСРВ, соответствующих стандарту ARINC 653) в качестве среды для развертывания БРИВС с ИСДР. К преимуществам можно отнести следующее:

- развертывание ИСДР в JetOS упрощает и структурирует модель БРИВС, так как часть ее функций реализуется средствами самой ОСРВ;
- функционирование всех элементов КБО синхронно и детерминировано во времени.

К недостаткам такого решения можно отнести следующие особенности:

- невозможность синтеза новой конфигурации в случае отсутствия подходящей в БЗ, что увеличивает надежность, но сужает диапазон поиска решений (данный недостаток можно нивелировать увеличением объема БЗ и наличием избыточности в наборе конфигураций);
- наличие множества центров управления (ИСДР и НМ) может приводить к коллизиям (недостаток нивелируется корректной организацией взаимодействия ИСДР и НМ);
- экземпляры ОСРВ на разных VM изолированы и независимы, что повышает надежность, но, вследствие этой идеологии, отсутствуют средства диспетчеризации связанных между собой VM на уровне ОС.

Полученные результаты применимы при моделировании, тестировании и исследовании свойств высокопроизводительных

структур КБО и общесамолетных систем на базе ИМА с использованием перспективных информационных интерфейсов и могут быть использованы при:

- проектировании архитектуры КБО воздушных судов гражданской авиации;

- разработке программного обеспечения при проведении ОКР по созданию КБО перспективных ВС на базе распределенной интегрированной модульной авионики.

Потенциальными потребителями полученных результатов являются авиастроительные конструкторские бюро, осуществляющие разработку воздушных судов гражданской авиации, самолетостроительные коллективы при создании перспективных отечественных летательных аппаратов, а также компании, стремящиеся модернизировать авионику эксплуатирующихся ВС с целью повышения ее соответствия перспективным международным требованиям надежности, а также экономичности и безопасности полетов.

Литература

1. Книга Е.В., Жаринов И.О., Богданов А.В., Виноградов П.С. Принципы организации архитектуры перспективных бортовых цифровых вычислительных систем в авионике // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – №5.

2. Короткова Т. И. Многокритериальный алгоритм принятия решения в системе обеспечения информационной безопасности объектов гражданской авиации //Труды МАИ. – 2015. – №. 84. – С. 36-36.

3. Назмутдинов И. С. Использование системы поддержки принятия решения для поиска места отказа в радиотехнических средствах обеспечения полетов авиации //Информатика: проблемы, методология, технологии. – 2017. – С. 318-322.

4. Семёнов М.Е., Соловьёв А.М, Новиков В.М., Мищенко И.Б. Формирование облика системы поддержки принятия решения в задачах администрирования и мониторинга комплекса бортового оборудования на базе полностью оптической бортовой сет // Международной научно-практической конференции «АВИАТОР» 11–12 февраля 2021 г. ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж).

5. Косьянчук В.В., Семёнов М.Е., Соловьёв А.М., Новиков В.М., Карпов Е.А., Мищенко И.Б. Концепция построения системы поддержки принятия решений при выполнении динамической реконфигурации комплекса бортового оборудования летательного аппарата // Теория и техника радиосвязи, №1, 2021 г.

6. Соловьёв А.М., Семёнов М.Е., Косьянчук В.В., Новиков В.М., Сельвесюк Н.И. Аппаратная реализация вычислительных процедур СППР в задачах авионики // XIII мультikonференция по проблемам управления МКПУ-2021, п. Дивноморское, г. Геленджик, 27 сентября – 2 октября 2021 г.