УДК 629.7.05

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

А.Б. Уманский, А.В. Леонтьев, А.С. Ананьин, Г.Е. Яцук

Представлен обзор типовых многомодульных цифровых вычислительных систем, созданных в «НПО автоматики» для систем автоматического управления. Приводятся структура и архитектурные особенности модульных вычислительных систем, построенных по магистральному принципу и принципу «точка-точка», описываются назначение и принцип взаимодействия их модулей. Рассматриваются вопросы реализации аппаратно-программных средств контроля и восстановления функционирования после сбоев и отказов. Делаются выводы о целесообразности развития представленных архитектур и сформулированы основные направления дальнейших работ по созданию перспективных вычислительных систем.

Ключевые слова: магистрально-модульная архитектура, распределённые вычислительные системы, коррекция.

Введение

На сегодняшний день устойчивой тенденцией развития систем управления подвижными объектами является ужесточение требований к точностным характеристикам. При этом, учитывая, что развитие отечественной элементной базы по-прежнему отстает от зарубежного уровня, для повышения «интеллекта» входящих подсистем, введения автономных контуров управления и коррекции параметров движения, возникает задача создания вычислителей (и вычислительных систем (ВС) в целом) со специализированной архитектурой.

Типовая САУ подвижного объекта решает следующий набор основных задач: навигации, стабилизации, коррекции. Задачи навигации отвечают за получение информации о движении аппарата. Стабилизация – получение информации об отклонениях в движении в результате воздействия внешних сил. Подсистема коррекция – более точная, чем инерциальная, но требует больших вычислительных ресурсов и временных затрат.

Для обеспечения функционирования в контуре управления подвижных объектов ВС должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- модульная архитектура;
- возможность построения как резервированных, так и нерезервированных систем;
- обеспечение высокоточного счета времени;
- обеспечение стойкости как к факторам космического пространства, так и к импульсным ионизирующим факторам;

- обеспечение уменьшения цикла решения задач управления для высокоманевренных систем;

- обеспечение длительной работы при минимальном потреблении электропитания;

- обеспечение технологичности программирования;

- обеспечение технологичности производства ВС.

Стремление реализовать выполнение этих требований привело к тому, что, начиная с 80-х гг. прошлого века по настоящее время, на НПОА были разработаны и запущены в производство несколько поколений ВС

ВС с централизованной архитектурой

Первое поколение ВС представляло собой мономашины (рис.1), т.е. все алгоритмы решались в центральной вычислительной машине, а периферийные аналого-цифровые подсистемы не содержали собственных вычислителей [1].

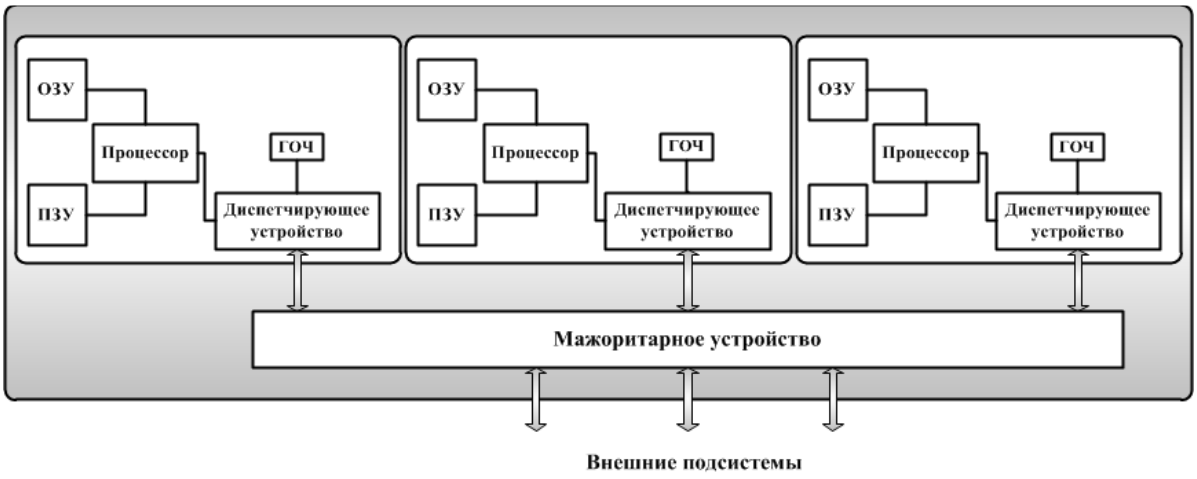


Рис. 1. Типовая структура первого поколения резервированных ВС

Применение таких систем вскоре выявило ряд существенных недостатков:

- необходимость введения избыточной аппаратуры для повышения точности и скорости решения сложных задач;

- ограничения на повышение надежности функционирования с минимизацией коэффициента резервирования аппаратуры;

- отсутствие унифицированных решений для различных условий применения;

- отсутствие набора функционально и конструктивно законченных модулей, обеспечивающих максимальную автономность отработки и модернизации;

- повышенная масса, габариты и энергопотребление.

Поэтому дальнейшее развитие было переориентировано в сторону распределения вычислительных задач, что делает ВС функционально законченной и позволяет проводить их модернизацию без переработки САУ в целом.

Распределенные ВС с магистрально-модульной архитектурой

В общем виде распределенную ВС можно представить следующим образом (рис. 2).

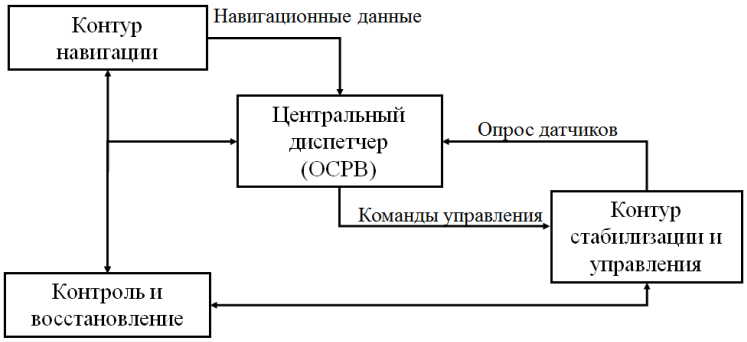


Рис. 2. Логика работы распределенной САУ

Для решения функциональных задач выделяются отдельные вычислительные контуры.

Контур навигации включает в себя подсистему инерциальной навигации, подсистему спутниковой коррекции или подсистему оптической/радиолокационной коррекции. Выход контура – навигационные данные. Контур стабилизации и управления двигательными установками – его взаимодействие с центральным диспетчером ограничивается докладом о состоянии дел и приемом команд об особенностях участка работы. Дополнительная информация может браться из контура навигации. Центральный диспетчер под управлением операционной системы реального времени (ОСРВ) решает задачи общего управления.

Для реализации такого вида САУ была разработана магистрально-модульная архитектура ВС (рис. 3).

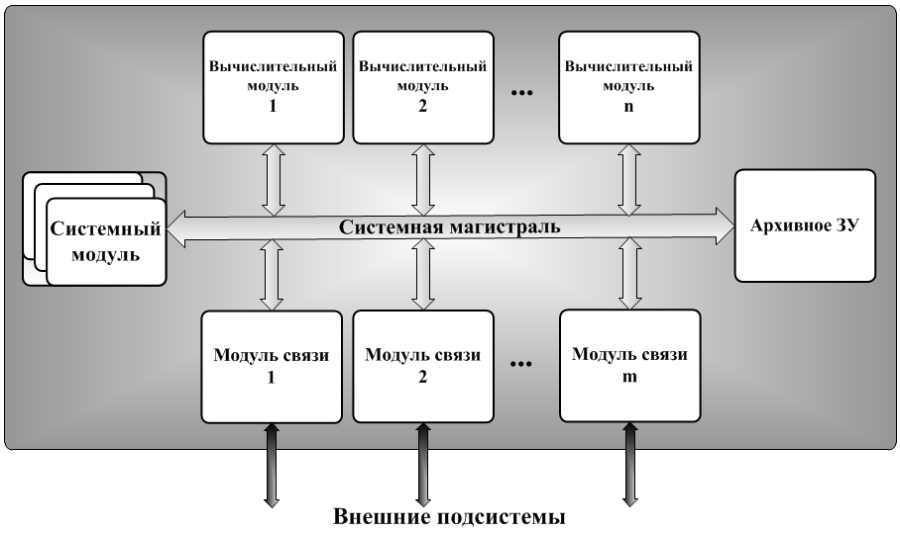


Рис. 3. Архитектура распределенной магистрально-модульной ВС

В состав ВС входят:

1. Троированный системный модуль (СМ) управления, который представляет собой функционально законченный вычислитель малой разрядности, ориентированный на задачи диспетчеризации, контроля и восстановления.

2. Функциональные вычислительные модули (ВМ), которые решают все основные функциональные задачи системы управления, за исключением задач по контролю исправности и нейтрализации возникающих отказов.

3. Модули связи (МС), обеспечивающие взаимодействие с наземной и периферийной аппаратурой по магистральным линиям связи. Интеллектуальные контроллеры каналов обмена позволяют снять с вычислительных модулей задачи по соблюдению протокола обмена и предварительной обработке информации.

Все модули объединены через системную резервированную магистраль.

На базе данной архитектуры было разработано несколько линеек ВС, применяемых в настоящее время в различных областях СУ РКТ.

Первой серийной ВС с магистрально-модульной архитектурой стало семейство модулей «Малахит-3» [2]. Основной особенностью данной ВС является то, что СМ представляет собой высоконадежный вычислитель с побитовой мажоритацией всей входящей и исходящей информации (рис. 4).



Рис. 4. Структура СМ «Малахит-3»

Следующей линейкой ВС стало семейство модулей «Малахит-7», отличающееся существенным повышением производительности и уменьшением количества аппаратуры в ее составе [2] (рис. 5).

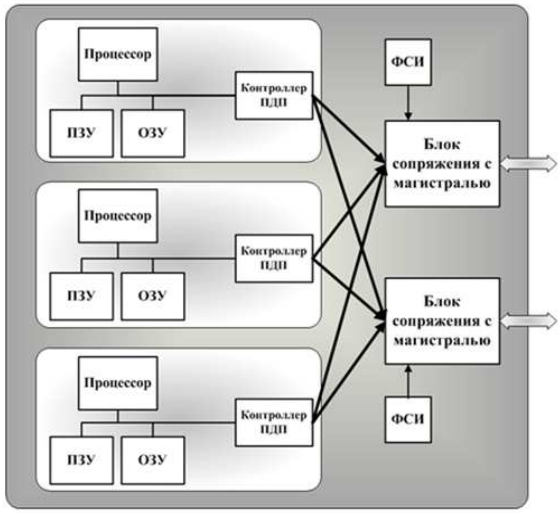


Рис. 5. Структура СМ «Малахит-7»

С точки зрения организации решения задач САУ вычислительный процесс (ВП) выглядит следующим образом (рис. 6).

Диспетчер подключается в конце каждого цикла основной программы, анализирует необходимость контроля, реконфигурации или восстановления, включает, при необходимости, соответствующую программу или отдает управление основной программе. Тестовый контроль служит для локализации места неисправности, определения отказов основного и дополнительного оборудования и поставляет соответствующую информацию программе анализа. Программа анализа определяет место отказа, выбирает ведущий модуль и определяет состояние остальных. Задача реконфигурации заключается в перестройке структуры при проведении восстановления сбившегося модуля или подключения в работу исправных модулей. Процедура восстановления готовит зоны информации для сбившегося модуля, производит передачу данных между модулями и выводит сбившийся модуль в рабочий режим.



Рис. 6. Организация контроля исправности и восстановления ВС с магистрально-модульной архитектурой

В процессе применения ВС с магистрально-модульной архитектурой выявились следующие проблемные вопросы:

1. Невозможность определения сбойного элемент магистрали без выключения БЦВС из контура управления.

2. Невозможность наращивания скорости обмена по магистрали пропорционально росту производительности современных процессоров и увеличивающимся объемам передаваемой информации.

Решение данных проблем потребовало пересмотра структуры и дальнейшего развития архитектуры ВС.

Распределенные ВС с архитектурой «точка-точка»

Для исключения этих недостатков, а также в целях сокращения массогабаритных характеристик наиболее оптимальным решением стал отказ от использования внутрисистемных магистралей в пользу межканальных связей типа «точка-точка» и выделенных управляющих модулей с возложением системных и диспетчирующих функций на программное обеспечение (ПО) [3]. Для обеспечения автономной работы ВС используется трехканальное ядро с программным мажоритаром состояния по два из трех (рис. 7).



Рис. 7. Структура трехканальной ВС с межканальными связями «точка-точка»

При этом взаимодействие с периферийными устройствами реализуется по магистральным унифицированным интерфейсам, подключаемым непосредственно к вычислителям.

С точки зрения организации решения задач САУ ВП выглядит следующим образом. Все три канала выполняют одновременно одну и ту же функциональную программу. При этом в заранее определенные моменты времени либо при вызове системной функции каналы квитируют друг друга. Если один из каналов не выдал квитанцию, а два других выдали, то первый канал считается сбившимся (рис. 8).

Независимо от причины сбоя, сбившийся канал должен быть перезагружен с целью его восстановления. Сигнал снятия питания должен выставить оба соседних канала. Только в этом случае схема сброса питания активируется. Восстанавливаемый канал инициализируется аналогично, как и при первой подаче питания. После инициализации канал квитирует соседние каналы об успешном запуске. Если после перезапуска канал не квитировал соседей, то считается, что канал ВС отказал. Дальнейшая отработка задания производится только оставшимися каналами.

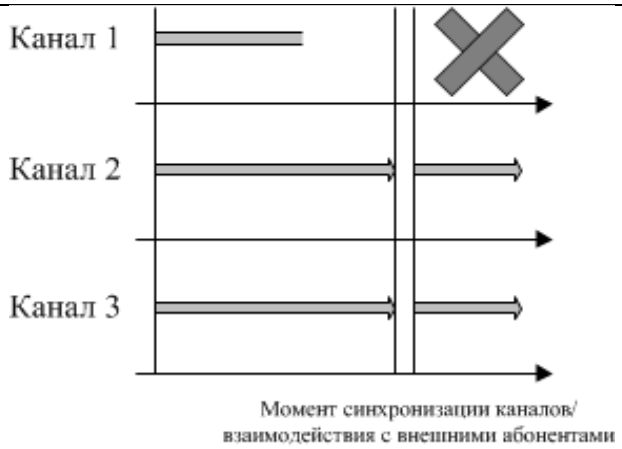


Рис. 8. Организация контроля исправности ВС с межканальными связями «точка-точка»

При успешном восстановлении восстанавливаемый канал должен получить из соседнего канала данные для восстановления работоспособности, включающие в себя либо все состояние памяти и регистров процессора, либо только ключевые параметры из СпОЗУ для восстановления ВП.

Однако недостатком такой структуры ВС стало то, что система с отдельными вычислительными модулями, достоверность которых сравнивается только в моменты задействования результатов их расчетов для текущего управления (списывания из них результатов во внешний мир), не позволяет локализовать во времени момент сбоя вычислителя. При этом отложенное диагностирование сбоя зачастую является недопустимым, т.к. на длительном интервале возможно возникновения второго сбоя, а к моменту его обнаружения может не остаться однозначно достоверного канала, по которому можно восстановиться.

Перспективная распределенная ВС с сетевой архитектурой

В настоящее время для исключения всех вышеобозначенных недостатков ведется разработка нового поколения ВС на базе сетевой архитектуры (рис. 9).

Достоверность вычислений обеспечивается работой двух (зеркальные) или более вычислительных ядер (3-канальный мажоритар), что одновременно обеспечивает живучесть внутри модуля. Организация внутримашинного межмодульного взаимодействия реализуется не по магистральному, а по сетевому принципу. Все физические соединения между модулями имеют топологию «точка-точка», построение сети обеспечивается специализированными модулями – сетевыми коммутаторами. При использовании современных интерфейсов (например, RapidIO) данные решения позволяют реализовывать для отдельных контуров очень короткие (до 1 мс) циклы управления, а сетевое соединение, в отличие от магистрального, позволяет масштабировать число каналов.

Заключение

Переход от мономашин к распределенным ВС позволил обеспечить выполнение всех требований, предъявляемых к ВС, входящих в состав САУ подвижных объектов.

Результаты отработки, испытаний и эксплуатации ВС НПОА показали, что магистрально-модульная архитектура не позволяет оперативно выявлять и локализовать сбои и отказы оборудования ВС: необходимо браковать все абоненты магистрали, с последующим длительным перебором абонентов для функционирования работы магистрали. Для восстановления состояния вычислителей необходима передача состояния памяти, при этом следует задействовать те же каналы обмена, что и для управления.

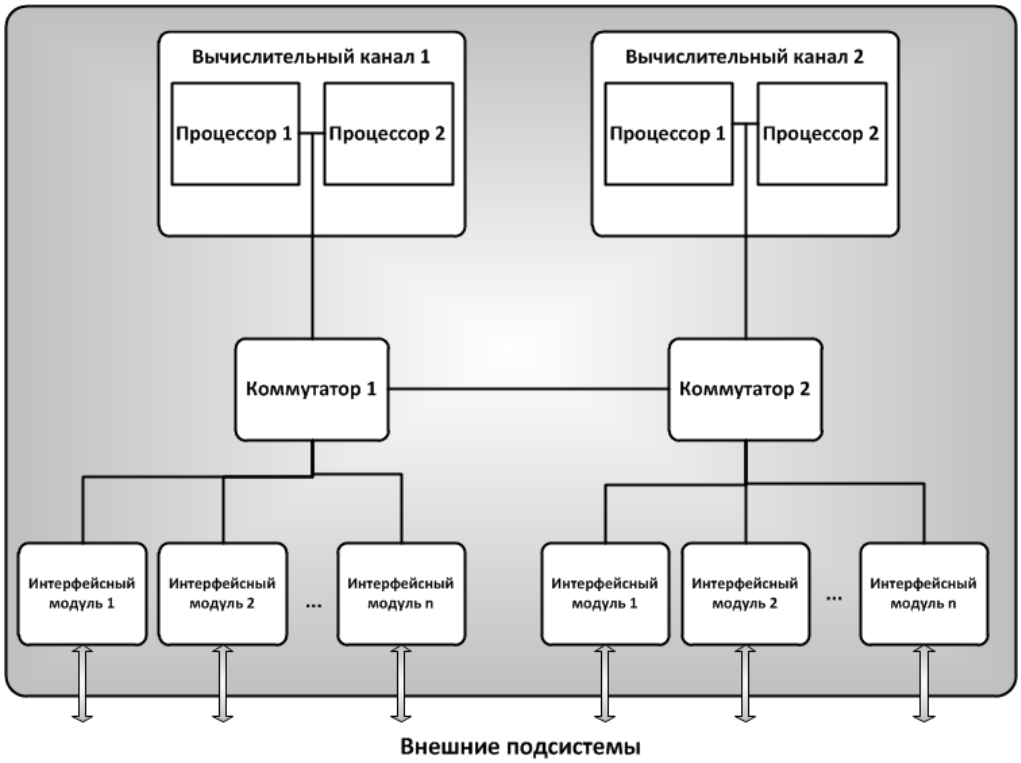


Рис. 9. Перспективная ВС на базе сетевой архитектуры

Реализация архитектуры ВС с типами связей «точка-точка» целесообразна при обеспечении достоверности вычислений внутри одного модуля. Данный подход упрощает создание ВС для конкретной системы управления, так как проектирование сводится к объединению необходимого набора модулей в конструкторскую сборку и основной задачей становится создание алгоритмов и программ. Это обеспечит расширение области применения ВС посредством снижения объемно-массовых характеристик и энергопотребления при одновременном использовании высокопроизводительных специализированных вычислителей.

Накопленные вопросы по результатам эксплуатации существующих архитектур выявили необходимость дальнейшего развития ВС для САУ подвижных объектов с учетом того, что вновь разрабатываемая архитектура ВС должна охватывать максимально широкий спектр применений с замещением существующих ВС.

Список литературы

1. Антимиров В.М., Трапезников М.Б. Поколения бортовых цифровых вычислительных систем // Вопросы атомной науки и техники. Серия. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. Научно-исследовательский институт приборов (Лыткарино). 2012. № 2. С.38-46.

2. Антимиров В.М., Уманский А.Б., Шалимов Л.Н. Бортовые цифровые вычислительные системы семейства «Малахит» для работы в экстремальных условиях // Вестник СГАУ. 2013. №4(42). С.19-27.

3. Есиновский А.В., Леонтьев А.В., Уманский А.Б. Вычислительный модуль повышенной надежности для систем управления космическими аппаратами // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Приложение за 2014 год. С.67-72.

Уманский Алексей Борисович, канд. техн. наук, начальник сектора, pdwn1982@yandex.ru, Россия, Екатеринбург, АО «Научно-производственное объединение автоматики им. академика Н.А. Семихатова»,

Яцук Георгий Евгеньевич, начальник сектора, rx9cim@rambler.ru, Россия, Екатеринбург, АО «Научно-производственное объединение автоматики им. академика Н.А. Семихатова»,

Ананьин Александр Сергеевич, инженер-конструктор, ananyinac@yandex.ru, Россия, Екатеринбург, АО «Научно-производственное объединение автоматики им. академика Н.А. Семихатова»,

Леонтьев Алексей Викторович, инженер-программист, lexman00@rambler.ru, Россия, Екатеринбург, АО «Научно-производственное объединение автоматики им. академика Н.А. Семихатова»

THE APPLICATION FEATURES DISTRIBUTED COMPUTING SYSTEMS IN THE CONTROL LOOP OF MOBILE OBJECTS

B. A. Umansky, A. V. Leont'ev, A. S. Anan'in, G. E. Yatsuk

The paper presents an overview of a typical multi-module digital computing systems created in "NPO automatics" for automatic control systems. Provides structure and architectural features modular computing systems based on the main principle and the principle of "point to point", describes the purpose and principle of the interaction of the modules. Consi-

ders the questions of implementation of hardware-software means of control and recovery of functioning after failures. The conclusions about expediency of development of the presented architectures and formulated the main directions of further work on the development of advanced computer systems.

Key words: trunk-modular architecture, distributed you-numbers system, correction.

Umansky, Alexey Borisovich, candidate of technical sciences, head of sector, pdwn1982@yandex.ru, Russia, Yekaterinburg, JSC "Scientific-production Association of automation named academician N. A. Semikhatova",

Yatsuk George E., head of sector, rx9cim@rambler.ru, Russia, Yekaterinburg, JSC "Scientific-production Association of automation named academician N. A. Semikhatova",

Anan'in Alexander, engineer, ananyinac@yandex.ru, Russia, Yekaterinburg, JSC "Scientific-production Association of automation named academician N. A. Semikhatova",

Leontev Alexey, engineer, lexman00@rambler.ru, Russia, Yekaterinburg, JSC "Scientific-production Association of automation named academician N. A. Semikhatova"

УДК 004.421.2

О ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОМ АЛГОРИТМЕ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

А.Б. Уманский, А.В. Леонтьев

Представлен децентрализованный алгоритм синхронизации времени для некоторых архитектур распределенных вычислительных систем. Ставится задача по созданию децентрализованного алгоритма синхронизации времени, позволяющего в отсутствие точного источника времени синтезировать время системы, максимально приближенное к астрономическому времени. Рассматривается математическая модель многоузловой вычислительной системы, учитывающая стохастическую природу шумов генератора узлов системы и транспортное запаздывание при маршрутизации пакетов с данными. Приводятся некоторые результаты, демонстрируемые разработанным алгоритмом децентрализованного типа в составе математической модели. Делаются выводы о применимости алгоритма в распределенных вычислительных системах.

Ключевые слова: децентрализованный алгоритм, синхронизация времени, распределенные вычислительные системы.

Введение

В вычислительных системах ответственного применения требуется наличие некоторого, в том числе и распределенного, узла, обеспечивающего достоверное принятие решений. При этом наличие центрального резервированного узла может не требоваться. Достаточно обеспечить некоторый механизм выработки соглашения в группе одноранговых узлов.