

УДК 629.78

Александр Николаевич Загорулько
Александр Геннадьевич Меланченко

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

Постановка проблемы. Анализ последних исследований и публикаций

Обсуждение проблем создания САУП невозможно без точного определения самого понятия “автономность”. В литературе понятия “автоматизация” и “автономность” определяются самыми различными способами, поэтому важно установить различия между ними и то, в каком контексте эти понятия будут употребляться в рамках настоящего исследования. Оба понятия характеризуют процессы, которые могут выполняться от начала до конца без какого бы то ни было вмешательства человека-оператора. В автоматизированных процессах рутинные ручные процессы просто замещаются аналогичными процессами, выполняемыми программно-аппаратными средствами в пошаговом режиме, и допускающими вмешательство человека-оператора в случае необходимости. Автономные процессы являются существенно более сложными, поскольку в них деятельность человека-оператора имитируется программно-аппаратными средствами, а не просто замещается ими.

Формулирование цели статьи.

Изложение основного материала

Введем следующее определение, которое характеризует автономность как фундаментальное свойство сложной системы (в данном случае – АКАНЗ).

Автономность представляет собой свойство системы, обеспечивающее возможность решения поставленных перед системой целевых задач с заданным уровнем эффективности в течение заданного интервала времени без использования внешнего управления.

Поясним далее некоторые принципиальные моменты, вытекающие из приведенного выше определения.

1. Границы системы, об автономности которой идет речь (в данном случае – АКАНЗ), должны быть четко определены, с указанием границ между системой и ее внешними интерфейсами.

2. Определение подразумевает наличие в составе автономной системы – АКАНЗ –

выделенной системы управления, функции которой реализуются в границах автономной системы. Для АКАНЗ система автономного управления не включает человека-оператора.

3. Целевые задачи, поставленные перед автономной системой, должны быть четко определены. В их число могут входить как все целевые задачи АКАНЗ, так и некоторая их часть, для которой требуется обеспечение автономности.

4. Заданный для автономной системы уровень эффективности может совпадать с номинальным уровнем эффективности АКАНЗ, либо определять некоторый пониженный уровень эффективности, приемлемый для периода автономной эксплуатации системы.

5. Должен быть определен заданный интервал времени, устанавливающий область определения проблемы автономного управления системой.

6. Автономность подразумевает возможность адаптации системы управления. Адаптация в данном случае включает возможность изменения программы управления при изменении целей АКАНЗ как автономной системы (автономное планирование) и возможность продолжения автономной эксплуатации АКАНЗ с некоторым (не ниже заданного) уровнем эффективности при возникновении неисправностей (отказоустойчивое управление).

7. АКАНЗ, как автономная система, может принимать в пассивном режиме информацию из-за своих пределов. Например, определение ориентации АКАНЗ по небесным ориентирам (звездам, Солнцу и т.п.) или по измерениям параметров физических полей (например, магнитного поля Земли), определение параметров орбиты АКАНЗ по информации спутниковых радионавигационных систем (GPS, ГЛОНАСС, и т.п.), калибровка ПН по результатам съемки наземных полигонов, или прием новых заданий на проведение наблюдений (изменение целей системы) не нарушает автономности АКАНЗ в смысле приведенного выше определения.

Таким образом, минимально необходимым набором дополнительных функций,

обеспечивающим автономное управление полетом, является планирование работы полезной нагрузки (ПН) и поддержание работоспособного состояния АКАНЗ. Функции навигационного обеспечения управления полетом утратили свое самостоятельное значение для обеспечения автономности АКАНЗ после появления глобальных спутниковых радионавигационных систем [1].

Тогда архитектуру САУП можно представить (рис. 1) как совокупность традиционной замкнутой системы управления, дополненной новыми функциональными подсистемами, реализующими функции автономного планирования и отказоустойчивого управления. Первая подсистема должна изменять поведение АКАНЗ в ответ на изменение целей управления полетом. Целью подсистемы автономного планирования является максимизация некоей функции полезности АКАНЗ с учетом ограниченности ресурсов, в том числе обусловленной возможными неисправностями.

Вторая подсистема должна обнаруживать и локализовать неисправности, определять надлежащие парирующие действия и реконфигурировать САУП для ее адаптации к неисправностям, то есть изменять поведение АКАНЗ в ответ на изменение его состояния. Неисправности рассматриваются при этом как аномальное поведение компонентов системы, которые могут привести к ее полному отказу и, как следствие, к невыполнению задач миссии. Тогда целью подсистемы отказоустойчивого управления является предотвращение развития неисправностей до уровня отказов путем реконфигурации САУП.

Алгоритмы автономного планирования являются весьма сложными, особенно с учетом необходимости их реализации в системе жесткого реального времени. Кроме того, эти алгоритмы существенно зависят от типа миссии АКАНЗ (для задач дистанционного зондирования Земли характерна съемка протяженных участков поверхности, размеры которых существенно превышают проекцию мгновенного поля зрения ПН на поверхность Земли, тогда как для задач космической разведки более характерна съемка малоразмерных участков, которые укладываются в проекцию мгновенного поля зрения ПН) и от характеристик самого АКАНЗ (тип и параметры используемой ПН, быстродействие и точность системы управления, и т.п.). Вместе с тем, интеграция подсистемы автономного планирования с традиционной замкнутой системой управления не представляет особых проблем, поскольку на интервале автономного полета выходная информация этой подсистемы – программа управления – просто замещает программу, традиционно формируемую в ЦУП и передаваемую на борт АКАНЗ. Поэтому дальнейшее изложение архитектуры САУП и

методики ее проектирования будет вестись преимущественно применительно к задаче интеграции подсистемы отказоустойчивого управления с традиционной замкнутой системой управления, а подсистема автономного планирования будет упоминаться в тех случаях, где это необходимо.

Компоненты подсистем САУП

Основными компонентами подсистемы отказоустойчивого управления САУП являются детекторы неисправностей, эффекторы и диспетчер. Подсистема автономного планирования САУП состоит из единственного компонента – собственно диспетчера. Вопрос распределения ресурсов диспетчера между двумя подсистемами будет рассмотрен далее.

Детекторы неисправностей предназначены для обнаружения одиночных неисправностей компонентов традиционной замкнутой системы управления – командных приборов, исполнительных органов и бортового компьютера. Каждый детектор обеспечивает обнаружение и локализацию одной неисправности или когерентной группы неисправностей. Детекторы неисправностей могут использовать информацию о соотношении сигналов различных командных приборов. Это позволяет им обнаруживать большее количество неисправностей командных приборов, чем может обнаружить бортовой компьютер путем первичной обработки и контроля корректности их сигналов.

Для обнаружения неисправностей командных приборов применимы различные методы – сравнение выходных сигналов, формируемых аппаратно-резервированными командными приборами, статистические испытания выходных сигналов, и сопоставление известного поведения объекта управления с поведением, определенным по результатам измерений параметров его состояния. Последний подход представляется наиболее перспективным, поскольку он ориентирован не на аппаратное, а на алгоритмическое резервирование командных приборов. В рамках этого подхода определение событий-неисправностей может быть осуществлено с помощью типовой процедуры, схема которой представлена на рисунке 2.

Формирование *вектора невязок* $g(t)$ осуществляется путем обработки измерений входных $x(t)$ и выходных $y(t)$ сигналов с использованием модели системы. Обнаруженные изменения вектора невязок используются затем для формирования *вектора симптомов* $s(t)$ события-неисправности. Наконец, производится локализация фактически неисправного компонента и формируется *вектор событий-неисправностей* $f(t)$. Такая обработка сигналов позволяет определить тип неисправности и время ее возникновения. Сформированная диагностическая информация передается диспетчеру для принятия решений.

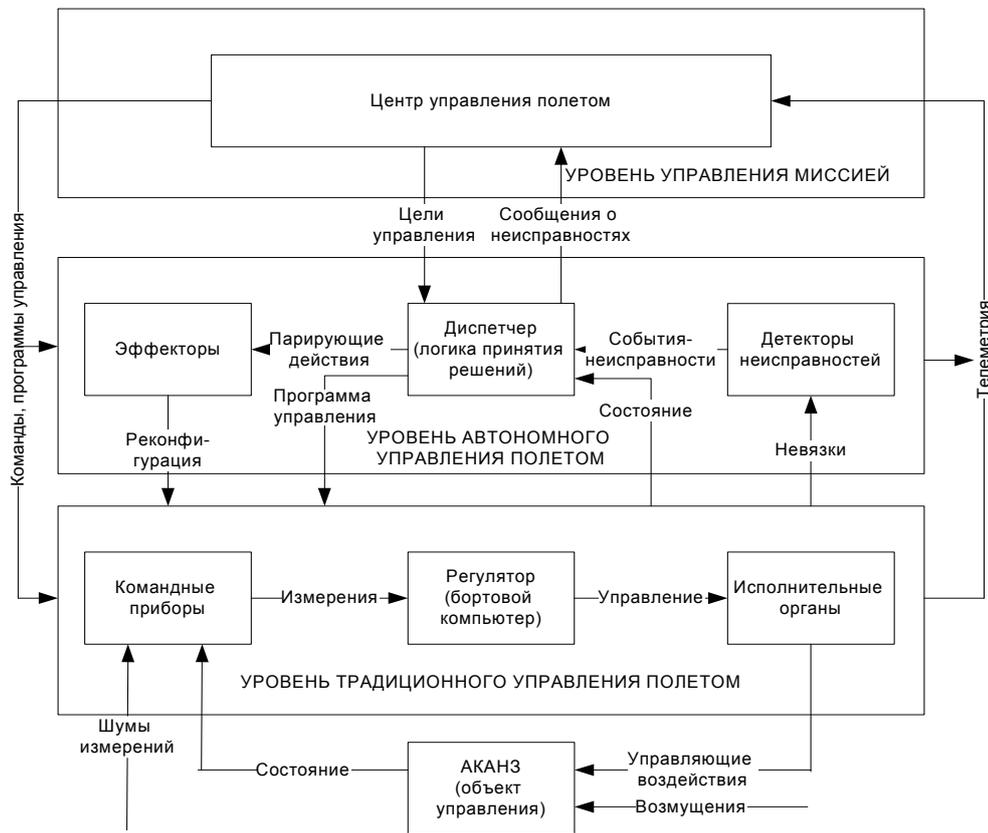


Рис. 1. Схема управления АКАНЗ

Эффекторы реализуют тот или иной алгоритм реконфигурации САУП, изменяющий закон управления АКАНЗ таким образом, чтобы исключить развитие обнаруженной неисправности до уровня отказа. Такой алгоритм может

предусматривать элементарное подключение резервных компонентов бортового оборудования, однако более эффективным является реконфигурация алгоритмов регулятора САУП в реальном времени.

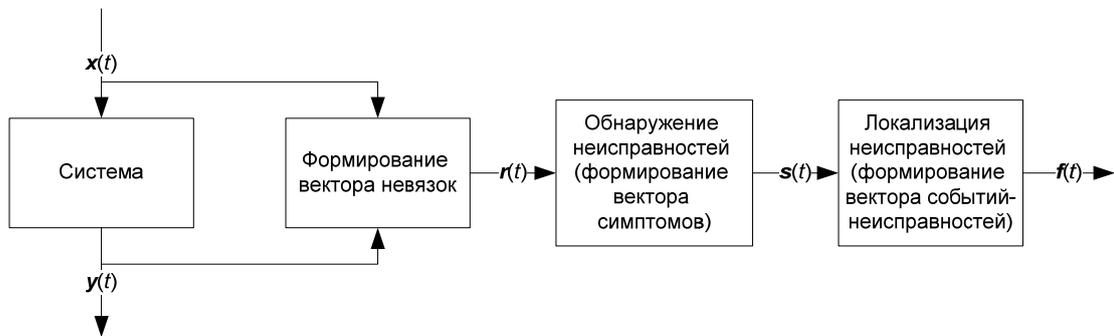


Рис. 2. Трехэтапный процесс определения событий-неисправностей – формирование невязок, обнаружение и локализация неисправностей

Диспетчер реализует алгоритмы подсистемы отказоустойчивого управления (алгоритмы принятия решений по парированию неисправностей) и алгоритмы подсистемы автономного планирования (алгоритмы принятия решений по изменению плана управления) АКАНЗ. Алгоритмы подсистемы отказоустойчивого управления должны обеспечить наилучшее в некотором смысле изменение состояния и/или структуры АКАНЗ для адаптации его к конкретной неисправности, и сформировать соответствующие сообщения для

уровня управления миссией. Эти решения диспетчер принимает на основе следующей информации:

Текущее состояние – диспетчер отслеживает текущее состояние уровня традиционного управления полетом: конфигурация командных приборов и исполнительных органов, режим работы регулятора, и т.п.

События-неисправности и информация о неисправностях – диспетчер принимает от детекторов неисправностей информацию о событиях, которые могут быть как истинными

неисправностями, так и сигналами «ложной тревоги». Для формирования адекватного решения по выбору парирующего действия диспетчер может также использовать дополнительную информацию, например, время возникновения неисправности, ее тип, или статистические данные о количестве «сигналов тревоги».

Командная информация – диспетчер принимает эту информацию (команды, программы, цели управления) от уровня управления миссией. В основном командная информация передается на уровень традиционного управления полетом, минуя диспетчера, однако может использоваться и на уровне автономного управления, например, для отключения детектора неисправностей из контура управления.

Алгоритмы подсистемы отказоустойчивого управления диспетчера реализуются в виде множества конечных автоматов типа «состояние-событие». Пример такого автомата представлен на рисунке 3. Автомат «состояние-событие» обеспечивает отображение входов диспетчера (событий-неисправностей и целей управления) на его выходы (парирующие действия и сообщения о неисправностях) в зависимости от текущего и предшествующего состояния АКАНЗ, которые хранятся в *базе данных состояний*, и с использованием набора правил отображения, заданных в виде *матрицы перехода*. Структурное выделение правил отображения позволяет верифицировать их независимо от реализации собственно автомата «состояние-событие».

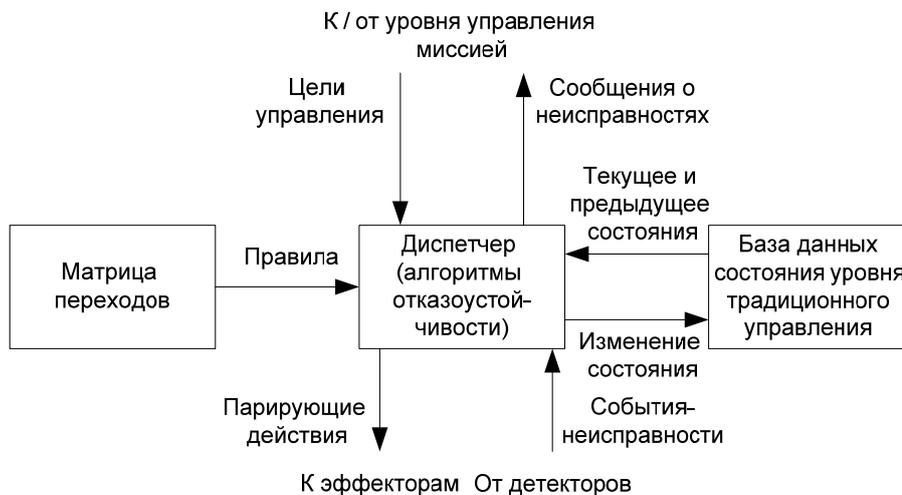


Рис. 3. Реализация алгоритмов подсистемы отказоустойчивого управления диспетчера как множества конечных автоматов типа «состояние-событие»

Подсистема автономного планирования САУП обеспечивает формирование программы управления АКАНЗ, которая передается затем для исполнения на уровень традиционного управления полетом, с учетом изменения целей управления, поступающих от уровня управления миссией, и состояния объекта управления. Учет текущего состояния АКАНЗ при формировании программы управления в реальном масштабе времени, в том числе возможных неисправностей, представляет собой чрезвычайно сложную задачу в силу ее высокой размерности. Однако практический опыт создания и эксплуатации АКАНЗ позволяет существенно упростить эту задачу путем разбиения множества состояний АКАНЗ на два непересекающихся подмножества – одноэлементное подмножество «нормальное состояние» и подмножество всех возможных аномальных состояний.

В самом деле, при проектировании АКАНЗ обязательно определяется совокупность целей управления, которые могут быть достигнуты в пределах ограничений на ресурсы, доступные при нормальном состоянии объекта управления. При возникновении неисправности наиболее

приоритетной целью управления становится парирование этой неисправности, причем реализация алгоритмов подсистемы отказоустойчивого управления в жестком реальном времени не является обязательной. В результате парирования может оказаться, что ограничения на ресурсы АКАНЗ становятся более сильными (например, снизилась мощность системы электроснабжения, доступная для использования ПН). Тогда подсистема отказоустойчивого управления должна сформировать соответствующие запросы на корректировку базы данных ресурсов АКАНЗ, используемую подсистемой автономного планирования. По завершении работы подсистемы отказоустойчивого управления формируется признак возврата АКАНЗ в нормальное состояние, и только после этого диспетчер подключает алгоритмы подсистемы автономного планирования, отключая одновременно алгоритмы подсистемы отказоустойчивого управления.

Описанная логика позволяет разделить алгоритмы подсистем автономного планирования и отказоустойчивого управления, и реализовывать их в диспетчере независимо. С учетом

изложенного «состояние», поступающее на вход диспетчера от уровня традиционного управления полетом (см. рис. 1), следует понимать не как текущий вектор состояния АКАНЗ, а как бинарный признак «нормальное / аномальное состояние».

Выводы

Рассмотрена архитектура системы автономного управления полетом (САУП) автоматического космического аппарата наблюдения Земли

Литература

1. Меланченко А.Г. Определение орбит космических аппаратов [Текст]: уч. пособ. / А.Г. Меланченко, И.А. Пятак. – Днепропетровск: РИО ДНУ им. О. Гончара, 2012. – 78 с. **2. Правила** космической деятельности в Украине. Разработка, изготовление и эксплуатация ракетно-космической техники (проект). УРКТ-01.01. – Киев:Национальное космическое агентство Украины,

(АКАНЗ). Система включает в себя традиционную замкнутую систему управления, реализующую традиционный уровень управления полетом, и две дополнительные подсистемы: подсистему автономного планирования и подсистему отказоустойчивого управления. В совокупности эти две подсистемы образуют верхний уровень иерархии бортовой системы управления АКАНЗ.

2001. – 121 с. **3. Эскизный** проект "Космическая система оптико-электронного наблюдения высокого разрешения Січ Перспектива. Пояснительная записка, Часть 1, Состав и основные характеристики космической системы, Січ Перспектива ПЗ 1.– ГП КБ «Южное», 2007. – 146 с.

Розглянуто архітектуру системи автономного управління польотом автоматичного космічного апарата спостереження Землі та її основні компоненти.

Ключевые слова: космічний апарат, управління польотом, автономність, відмовостійкість.

Architecture and the base components of the self-contained guidance system for unmanned spacecraft for observations of the Earth are described.

Key words: spacecraft, flight control, self-sufficiency, fail-operational capability.