

## АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В. А. КОСТЕНКО

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991, Москва, Россия  
E-mail: kostmsu@gmail.com

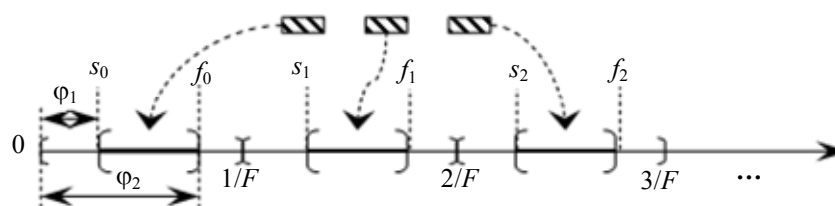
Рассмотрены основные особенности программно-аппаратных комплексов бортового оборудования с федеративной и интегрированной модульной архитектурой. На примере локационной системы рассмотрены причины, которые могут приводить к увеличению аппаратных затрат при выполнении в режиме реального времени функциональных программ в комплексах с интегрированной модульной архитектурой.

**Ключевые слова:** системы реального времени, встроенные системы, интегрированная модульная архитектура, программа, виртуальный канал

Основные требования к программно-аппаратным комплексам бортового оборудования (КБО) — интеграция комплекса с управляемым объектом, ограниченное участие оператора в работе комплекса, непрерывное функционирование, работа в режиме реального времени, высокая надежность, жесткие ограничения на массогабаритные характеристики.

В настоящее время КБО имеют либо федеративную архитектуру, либо интегрированную модульную архитектуру (ИМА). В настоящей статье эти два подхода к построению КБО рассматриваются с точки зрения достижения следующих целей: сокращение аппаратных затрат, необходимых для выполнения функциональных программ в режиме реального времени, сокращение сроков и стоимости проектирования комплекса.

Режим работы КБО с федеративной архитектурой характеризуется набором функциональных задач (программ), для каждой из которых задаются требования к ее выполнению в режиме реального времени. Например, для каждой программы задаются частота  $F$  ( $1/F$  — период) ее выполнения и фазовые сдвиги  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ . Частота определяет совокупность интервалов времени выполнения программы, длительность которых равна ее периоду. Фазовые сдвиги задают время внутри каждого интервала ( $(s_i, f_i)$  — директивный интервал), в рамках которого программа обязательно должна быть выполнена (см. рисунок).



В комплексах бортового оборудования реализованы три уровня обработки данных: предобработка, первичная обработка и вторичная обработка. Чтобы обеспечить выполнение функциональных программ в режиме реального времени необходима производительность на уровне первичной обработки данных.

В КБО с федеративной архитектурой каждая подсистема выполняет свои функциональные задачи и имеет свой вычислитель для первичной обработки данных, который соединяется с источниками/приемниками устройств подсистемы локальной сетью. Для обеспечения производительности, необходимой для выполнения программ в режиме реального времени, применяются специализированные вычислительные модули. В качестве бортовой сети обмена

данными во многих комплексах используется канал с централизованным управлением MIL STD-1553B (ГОСТ Р 52070-2003). Системный интегратор КБО работает на уровне подсистем и ему недоступны их вычислительные и сетевые ресурсы.

Так как ресурсы вычислителя используются функциональными программами подсистемы монопольно, то его загрузка может быть низкой, если: 1) система работает в небольшом числе режимов, 2) разница между периодом и директивным интервалом выполнения программ подсистемы велика. В этих случаях большую часть времени работы КБО вычислитель подсистемы простаивает.

Сокращение сроков и стоимости проектирования КБО с федеративной архитектурой, а также повышение надежности комплекса за счет использования ранее разработанных и апробированных аппаратных и программных компонентов проблематично. Это обусловлено тем, что унификация осуществляется на уровне подсистем, и зачастую программные и аппаратные средства некоторой подсистемы недоступны разработчикам других подсистем и системному интегратору. Также существует проблема настройки подсистем для конкретных применений, что связано с изменением размера обрабатываемых массивов данных в зависимости от требуемых функциональных характеристик подсистемы.

Сокращение сроков и стоимости проектирования, а также повышение надежности КБО с интегрированной модульной архитектурой возможно за счет использования унифицированных ранее разработанных и апробированных аппаратных и программных компонентов, в частности интерфейсов аппаратных и программных средств с возможностью их повторного использования и переносимости.

Уменьшения аппаратных затрат на вычислительные ресурсы предполагается достигать за счет использования единого бортового вычислителя, при этом его ресурсы могут распределяться между функциональными программами различных бортовых подсистем. Единый бортовой вычислитель понимается как набор вычислительных модулей, каждый из которых системный интегратор комплекса может использовать для выполнения функциональных программ.

Наиболее часто используемые при построении КБО стандарты: ARINC 651, FC-AE-ASM-RT, ARINC 664 (AFDX), ARINC 653. Стандарт ARINC 651 [1] регламентирует основные принципы построения комплексов на основе ИМА.

Стандарт ARINC 653 [2] регламентирует построение операционных систем, которые позволяют обеспечить выполнение программ в режиме реального времени. Российской операционной системой реального времени, соответствующей этому стандарту, является Багет 3.0 [3], в котором реализованы все обязательные функции стандарта ARINC 653.

Рассмотрим на примере локационной системы причины, которые могут приводить к снижению эффективности использования вычислительных и сетевых ресурсов КБО с ИМА и, следовательно, к увеличению его массогабаритных характеристик.

*Увеличение потока данных в бортовой сети обмена.* В вычислителе локационной подсистемы с фазированной антенной решеткой (ФАР) выполняются перечисленные ниже операции [4, 5], где приняты следующие обозначения:  $K$  — количество элементов антенной решетки,  $(-B, B)$  — полоса частот принимаемых сигналов,  $L = B/\Delta f$  — количество анализируемых элементов разрешения по частоте,  $\Delta f$  — требуемая спектральная разрешающая способность,  $n$  — количество выборок анализируемых сигналов,  $M$  — число источников сигналов,  $a$  — нормализующий коэффициент (по теореме Котельникова  $a \geq 2,5$ ).

1. Оцифровка и нормализация данных, снимаемых с ФАР; слов данных:  $K$ , период опроса:  $1/aB$ .

2. Быстрое преобразование Фурье (БПФ);  $K$  операций БПФ для  $L$  точек, период выполнения:  $L/aB$ .

3. Формирование оценки взаимно-спектральной матрицы;  $Ln$  операций внешнего произведения векторов размером  $K$ , период выполнения:  $nL/aB$ .

4. Определение собственных значений и векторов взаимно-спектральных матриц или их обращение;  $L$  матриц размером  $K \times K$ , период выполнения:  $nL/aB$ .

5. Определение угловых координат объектов; результат:  $3M$  слов данных, период выдачи:  $nL/aB$ .

В случае КБО с ИМА в подсистеме выполняются лишь оцифровка и нормализация данных, снимаемых с ФАР, остальные вычисления выполняются в бортовом вычислителе.

Таким образом, в комплексах с федеративной архитектурой количество слов данных составляет  $3M$ , а период выдачи —  $nL/aB$ ; в комплексах с интегрированной модульной архитектурой слов данных —  $K$ , период выполнения —  $1/aB$ .

Параметры локационных систем имеют следующие значения:  $32 \leq K \leq 2048$ ,  $1 \leq M \leq 100$ ,  $n > 100$ ,  $32 \leq L \leq 248$ . Следовательно, в комплексах с ИМА поток данных, поступающих от локационной системы, увеличивается в  $10^3$ — $10^5$  раз по сравнению с комплексами с федеративной архитектурой. Иными словами, перенос программ локационной подсистемы на бортовой вычислитель приводит к значительному увеличению потока данных в бортовой сети обмена. Аппаратные затраты на увеличение пропускной способности бортовой сети обмена могут превысить аппаратные затраты на вычислительные ресурсы.

*Использование универсальных вычислительных модулей и языков программирования высокого уровня.* По критерию „производительность/аппаратные затраты“ значительно эффективнее спецпроцессоры. При использовании спецпроцессоров с унифицированными интерфейсами [6] в качестве модулей бортового вычислителя (например, систолических процессоров) существует проблема их настройки под объем обрабатываемых массивов данных.

Критериям универсальность и „производительность/аппаратные затраты“ соответствуют процессоры цифровой обработки сигналов, для программирования которых обычно используется один из двух языков высокого уровня — ассемблер или Си. Применение, в частности, языка Си позволяет ускорить создание программ, обеспечить их переносимость и повторное использование. При этом, однако, ресурсы процессора будут использоваться менее эффективно, чем при создании программой, полностью написанной на ассемблере. Время выполнения программ увеличивается на порядок [7].

Как следует из вышеизложенного, аппаратные затраты на выполнение программы в режиме реального времени могут увеличиваться при ее переносе с вычислителя подсистемы на бортовой вычислитель при соблюдении следующих условий:

— разница между временем выполнения программы на бортовом вычислителе и периодом ее выполнения мала;

— программа должна выполняться во всех режимах работы КБО;

— перенос программы на бортовой вычислитель приводит к значительному увеличению потока данных в бортовой сети обмена.

Если существуют программы, для которых перечисленные условия выполняются, то переход от федеративной архитектуры к интегрированной модульной может приводить к увеличению аппаратных затрат на построение комплекса. При этом переход от федеративной архитектуры к ИМА не всегда означает (для любого комплекса) уменьшение аппаратных затрат. Таким образом, для ряда комплексов наиболее эффективными по аппаратным затратам будут гибридные архитектуры: для некоторых подсистем функциональные программы выполняются на вычислителе подсистемы, а из других подсистем программы перенесены на единый бортовой вычислитель.

В КБО с федеративной архитектурой основная задача — это построение расписания обменов данными по каналам с централизованным управлением. При построении КБО с ИМА

значительно возрастает сложность этапа комплексирования подсистем. При этом требуется решить следующие задачи:

- структурный синтез бортового вычислителя: определение количества вычислительных модулей, количества ядер и объема памяти вычислительного модуля;
- структурный синтез бортовой сети обмена: определение количества коммутаторов, их характеристик и топологии сети;
- построение согласованных расписаний выполнения функциональных задач и обменов данными.

Для сокращения сроков и стоимости проектирования КБО с ИМА необходимы САПР, позволяющие решить перечисленные задачи и определить программы первичной обработки данных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ARINC 651-1. Design Guidance for Integrated Modular Avionics. 1997.
2. Arinc Specification 653. Airlines Electronic Engineering Committee [Электронный ресурс]: <<http://www.arinc.com>>.
3. Годунов А. Н., Солдатов В. А. Операционные системы семейства Багет (сходство, отличия и перспективы) // Программирование. 2014. № 5. С. 69—76.
4. Костенко В. А. Построение вычислительных комплексов цифровой обработки сигналов с концепцией архитектуры „открытых“ систем // Автоматика и телемеханика. 1994. № 12. С. 151—162.
5. Костенко В. А. Крупноблочный параллелизм в задачах обработки сигналов // Программирование. 1997. № 2. С. 67—75.
6. Шукалов А. В., Парамонов П. П., Книга Е. В., Жаринов И. О. Принципы построения вычислительных компонентов систем интегрированной модульной авионики // Информационно-управляющие системы. 2014. № 5. С. 64—71.
7. Балашов В. В., Капитонова А. П., Костенко В. А., Смелянский Р. Л., Юценко Н. В. Метод и средства оценки времени выполнения оптимизированных программ // Программирование. 1999. № 5. С. 52—61.

#### Сведения об авторе

**Валерий Алексеевич Костенко** — канд. техн. наук; МГУ им. М. В. Ломоносова; кафедра автоматизации систем вычислительных комплексов; E-mail: kostmsu@gmail.com

Рекомендована Университетом

Поступила в редакцию  
29.09.16 г.

**Ссылка для цитирования:** Костенко В. А. Архитектура программно-аппаратных комплексов бортового оборудования // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 3. С. 229—233.

#### ARCHITECTURE OF SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEXES OF ON-BOARD EQUIPMENT

V. A. Kostenko

M. V. Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russia  
E-mail: kostmsu@gmail.com

The main features of the avionics systems with federated and integrated modular architecture are considered. The causes, which can lead to increased hardware costs when running functional programs in real-time in complexes with integrated modular architecture are analyzed by the example of a location system.

**Keywords:** real-time systems, embedded systems, integrated modular avionics, program, virtual channel

**Data on author**

**Valery A. Kostenko**

— PhD; M. V. Lomonosov MSU, Department of Computer Systems Automation; E-mail: kostmsu@gmail.com

**For citation:** *Kostenko V. A.* Architecture of software and hardware complexes of on-board equipment // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 3. P. 229—233 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-3-229-233