

## ПРОБЛЕМЫ ОТРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Современная бортовая радиоэлектронная аппаратура (БА), использующая программируемые логические интегральные схемы, микроконтроллеры, встроенные вычислительные модули и т. д., требует специальных методов отладки, поскольку в ее состав вводится дополнительная нематериальная составляющая – программное обеспечение (ПО). Отработка ПО осложняется тем, что некоторые ошибки его разработки, приводящие к сбоям, проявляются только в процессе длительного функционирования БА. Для выявления этих сбоев необходима специальная аппаратура по обеспечению долговременного прогона ПО, имитирующая условия функционирования БА во время длительной эксплуатации.

*Ключевые слова:* бортовая аппаратура, программное обеспечение, отработка, эмуляция, интерфейсы.

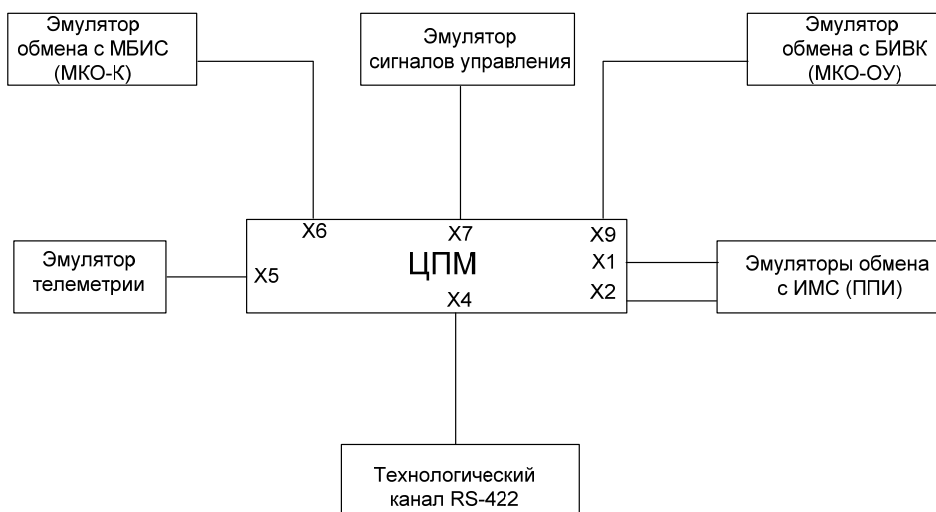
В настоящее время графики изготовления аппаратуры современных космических аппаратов (КА) для проведения отработочных испытаний и комплектации штатных изделий отличаются исключительно высокой интенсивностью, поэтому обеспечение отработки функциональной логики и разработанного ПО для бортовой аппаратуры (БА) на более ранних этапах является крайне важным. При этом следует иметь в виду то, что при испытаниях серийных приборов со встроенным процессором в цехе-изготовителе обрабатывается не более 30 % всех возможных вариантов функционирования ПО.

Комплексные испытания дают не более 70 % полноты проверки. И только специальные отработочные испытания ПО на базе реализованных математических моделей функциональных блоков, интерфейсных модулей сопряжения и приборов, обеспечивающие проверку на все предполагаемые ситуации эксплуатации КА, способны гарантировать 100%-й результат, в том числе проведение анализа поведения БА в различных аварийных ситуациях в процессе эксплуатации КА.

Для проведения специальных программных отработочных испытаний (ПОИ) приборов с вычислителями в отделе проектирования и испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) систем управления КА ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» создан наземный отладочный комплекс (НОК) для отработки бортового ПО, который не только ускоряет процесс ПОИ, но и позволяет имитировать различные нештатные ситуации работы БА (в том числе для исследования всевозможных отказов) [1].

Наземный отладочный комплекс разработок на основе международного магистрально-модульного стандарта CompactPCI/PCI [2].

Аппаратура НОК имитирует входные сигналы, поступающие на процессор бортовой аппаратуры, и регистрирует его выходные сигналы, эмулируя работу приборов в составе КА (см. рисунок). Отработка ПО без использования реальных технических средств позволяет имитировать различные ситуации без изменения аппаратного состава схемы отработочных испытаний, исключая риск выхода из строя аппаратных средств НОК и самой РЭА.



Функциональная схема НОК:  
ЦПМ – центральный приборный модуль

Разработка специальных программ испытаний ПО на эмуляторах позволяет довести до максимальной полноты проверок всех предполагаемых ситуаций, возможных во время штатной работы приборов в составе КА. Результаты исследования работы ПО при имитации различных нештатных ситуаций могут быть использованы для объяснения работы бортовой РЭА в условиях полета, когда аппаратура недоступна для непосредственного наблюдения и контроля.

Все эмуляторы представляют собой специально разработанные программно-технические устройства, образующие единый аппаратно-программный комплекс динамической отработки ПО РЭА в режиме реального времени. Отработка ПО осуществляется на технологическом процессоре – центральном приборном модуле (ЦПМ), выполненном по штатной документации. Аппаратура НОК моделирует внешнюю среду.

В настоящее время аппаратно-программная эмуляция интерфейсов связи, как правило, выполняется с помощью программируемых контроллеров с более или менее жесткой логикой и схемной реализацией технических решений. Это облегчает программирование, но серьезно затрудняет модернизацию эмулятора при каких-либо изменениях в интерфейсах.

В существующей версии НОК эта проблема решена с помощью специального модуля цифрового ввода-вывода с программируемой интегральной логической схемой (ПЛИС). Эмуляция канала управления ИМС и обмена данными процессора с моделями их функционирования основана на программировании ПЛИС с помощью пакета LabVIEW FPGA. В библиотеку LabVIEW FPGA Module встраивается функционирующий по алгоритму универсальной модели ИМС проект, который разработан в схемотехническом редакторе XILINX [3]. В результате будет получен аппаратный программируемый контроллер с достаточно легко меняемой логикой функционирования. Подобную схемную реализацию технических решений можно назвать наилучшей, если в ней участвует высококвалифицированный инженер-схемотехник с соответствующим опытом работы в области программирования ПЛИС.

В вычислительной технике достаточно давно использовался способ реализации параллельных интерфейсов на программируемых TTL-регистрах ввода-вывода.

Классическим примером такого TTL-регистра является параллельный порт ПЭВМ типа IBM PC, который программируется для управления соответствующим подключенным к нему устройством (принтером, сканером или интерфейсом связи между компьютерами) по мере необходимости [4]. Падение интереса к подобным решениям было связано с резким увеличением скорости обмена современных интерфейсов, от которых TTL-регистры на какой-то момент существенно отстали.

Однако в настоящее время производители электронного оборудования предоставляют аппаратуру, способную программно генерировать импульсы с частотой в десятки и сотни мегагерц. Именно на основе таких высокоскоростных TTL-регистров ввода-вывода стала возможной реализация НОК с эмулирующей каналом управления и обмена данными под управлением операционной системы (ОС) реального времени (РВ).

Сигналы внутрприборного интерфейса БА подаются через кабель на регистр ввода-вывода, где они фиксируются, расшифровываются и откуда поступают на обработку в запущенную на промышленном компьютере виртуальную модель ИМС. На основе полученных данных формируется ответ для процессора, который затем через TTL-регистр ввода-вывода передается по протоколу внутрприборного интерфейса.

Главным достоинством использования высокоскоростных TTL-регистров ввода-вывода является относительно низкая себестоимость разработки эмулятора интерфейса на их основе по сравнению с модулями цифрового ввода-вывода с ПЛИС, а также то обстоятельство, что для этого требуется только квалифицированный программист, а не инженер-системотехник. И даже повышенные требования к компьютеру и необходимость использования ОС РВ в настоящее время не являются серьезными недостатками, так как вычислительная техника с каждым годом одновременно с увеличением мощности становится все более дешевой, а обучить программиста работе в режиме реального времени намного проще, чем схемотехника программированию ПЛИС.

Пожалуй, единственным недостатком этой реализации эмулятора интерфейса является то, что для ряда сверхскоростных интерфейсов невозможно использование доступных на данный момент высокоскоростных TTL-регистров ввода-вывода. Такие интерфейсы лучше эмулировать модулями с ПЛИС, а высокая себестоимость в этом случае уже не будет иметь особого значения.

Таким образом, НОК способен имитировать обмен по любому интерфейсу процессора БА в режиме реального времени. Это позволяет использовать НОК в качестве основы для специальных рабочих мест (РМ) долговременного прогона (ДП) БА, на которых отрабатывается процесс непрерывного бессбойного функционирования бортового ПО длительностью до 90 сут, так как отвлекать на такое длительное время штатное цеховое испытательное оборудование невозможно ни технически, ни организационно [5].

Принцип построения РМ ДП состоит в применении реальных вычислителей с имитацией для них космических условий функционирования БА. При невозможности запуска бортового ПО только на одном вычислителе (без остальных аппаратных средств БА) используется реальный бортовой отработочный прибор (целиком или частично).

Программное обеспечение функционирует на реальном вычислителе в течение длительного времени в условиях имитации эксплуатационной обстановки. Программные ошибки, не обнаруженные на отработочных испытаниях БА из-за их относительной кратковременности, постепенно начинают вызывать сбои в ее работе. Анализ состояния телеметрии БА и технологический контроль аппаратных средств и ПО позволяют сделать определенные выводы о причинах сбоев и путях их устранения. Доработка бортового ПО и его повторный запуск на долговременный прогон проверяют эти выводы на практике.

Такая технология отработки дает возможность корректировать ПО уже запущенной в полет БА (при условии наличия возможностей по ее перепрограммированию в процессе эксплуатации), что увеличивает срок активного существования космических аппаратов, а иногда даже помогает восстановить утраченную ими работоспособность.

Таким образом, отработка БА на РМ ДП показывает скрытое влияние некоторых особенностей функционирования технических средств бортовых приборов на работоспособность ПО БА при длительной эксплуатации. Из-за относительной кратковременности отработочных испытаний БА это влияние может быть обнаружено только при ее долгосрочном функционировании. Изменение аппаратных средств к моменту их обнаружения зачастую уже невозможно, поскольку КА в это время находится на последних стадиях испытаний или уже запущен. В таком случае остается только искать возможность программными средствами парировать сбои или отказы БА.

Информация, полученная при долговременном прогоне БА, может быть использована не только для корректировки бортового ПО, но и при новых разработках аппаратных средств. Обнаруженный эффект влияния особенностей функционирования аппаратных средств на ПО позволяет говорить о необходимости создания специальных рабочих мест долговременного прогона любых программно-управляемых устройств БА, предназначенных для длительной эксплуатации.

#### Библиографические ссылки

1. Пичкалев А. В. Наземный отладочный комплекс бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Решетневские чтения : материалы XIV Междунар. науч. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. Ч. 2. С. 515–516.
2. Жариков В. Н., Пичкалев А. В. Новые технологии для испытательного оборудования // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 1 (34). С. 132–135.
3. Комаров В. А., Пичкалев А. В. Применение технологий NI FPGA при испытаниях бортовой аппаратуры космических аппаратов // Интеллект и наука : тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. Железногорск, 2011. С. 146.
4. Гук М. Интерфейсы ПК : справочник. СПб. : Питер, 1999.
5. Пичкалев А. В. Создание автоматизированного мобильного испытательного комплекса для цеховых испытаний программно-управляемой радиоэлектронной аппаратуры // Решетневские чтения : материалы XIII Междунар. науч. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009. Ч. 2. С. 528–529.

V. N. Zharikov, A. V. Pichkalev

#### PROBLEMS OF OPTIMISATION OF SOFTWARE OF ON-BOARD RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT

*The modern on-board radio-electronic equipment, using FPLD, i. e. microcontrollers, computing modules etc., demands special methods of debugging, since an additional non-material constituent, namely, software, is entered into its structure. Software debugging is specific, since some errors of its development, leading to failures, can be revealed only during long-term operation of onboard equipment. Special equipment, that can ensure a long-term operation of software and simulate operating conditions during long term operation, is required for revelation of these software failures and providing with long-term prognosis.*

*Keywords: on-board equipment, software, optimization, emulation, interfaces.*

© Жариков В. Н., Пичкалев А. В., 2012