



*Достижение высокого технологического уровня радиоэлектроники невозможно без поддержания современного уровня знаний. Серия книг «Мир радиоэлектроники» с 2010 года успела зарекомендовать себя как собрание актуальной научной и технической литературы.*

*Директор Департамента  
радиоэлектронной промышленности  
Минпромторга России С.В. Хохлов*



**ТЕХНОСФЕРА**  
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ КНИГ «МИР РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

**Хохлов Сергей Владимирович**, директор Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга РФ – председатель редсовета

### *Члены совета:*

**Авдонин Борис Николаевич**, ОАО ЦНИИ «Электроника», д.т.н., профессор, г. Москва  
**Акопян Иосиф Григорьевич**, ОАО «МНИИ «Агат», д.т.н., профессор, г. Москва  
**Анцев Георгий Владимирович**, ген. директор ОАО «Концерн «Моринформсистема-Агат», г. Москва  
**Белый Юрий Иванович**, ген. директор НИИП им. В.В. Тихомирова, г. Жуковский  
**Беккиев Азрет Юсупович**, ген. директор ОАО «Концерн «Созвездие», д.т.н., профессор, г. Воронеж  
**Боев Сергей Федотович**, ген. директор ОАО «РТИ», д.э.н., профессор, г. Москва  
**Борисов Юрий Иванович**, заместитель Министра обороны РФ, д.т.н., профессор, г. Москва  
**Букашкин Сергей Анатольевич**, ген. директор ОАО «Концерн «Автоматика», д.т.н., профессор, г. Москва  
**Бушуев Николай Александрович**, ген. директор ОАО «НПП «Алмаз», д.э.н., профессор, к.ф.-м.н., г. Саратов  
**Верба Владимир Степанович**, ген. директор ОАО «Концерн радиостроения «Вега», д.т.н., профессор, г. Москва  
**Верник Петр Аркадьевич**, директор АНО «Институт стратегий развития», г. Москва  
**Вилкова Надежда Николаевна**, ген. директор ЗАО «МНИТИ», к.т.н., д.э.н., профессор, г. Москва  
**Гаршин Вадим Вениаминович**, ген. директор ОАО «Мосэлектронпроект», г. Москва  
**Гуляев Юрий Васильевич**, директор института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова, академик РАН, г. Москва  
**Зверев Андрей Владимирович**, ген. директор ОАО «Российская электроника», к.э.н., г. Москва  
**Кожанов Дмитрий Александрович**, ген. директор ФГУП «ЦНИИ ЭИСУ», г. Москва  
**Козлов Геннадий Викторович**, советник ген. директора ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей», д.т.н., профессор, г. Москва  
**Красников Геннадий Яковлевич**, ген. директор ОАО «НИИМЭ», академик РАН, г. Зеленоград  
**Критенко Михаил Иванович**, зам. начальника Департамента планирования и промышленной политики, к.т.н., г. Москва  
**Мальцев Петр Павлович**, директор ИСВЧПЭ РАН, д.т.н., профессор, г. Москва  
**Минаев Владимир Николаевич**, д.т.н., профессор, г. Москва  
**Муравьев Сергей Алексеевич**, советник директора Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга России, к.т.н., с.н.с., г. Москва  
**Немудров Владимир Георгиевич**, ген. директор ОАО «НИИМА «Прогресс», д.т.н., профессор, г. Москва  
**Попов Владимир Васильевич**, президент ОАО «Светлана», к.т.н., г. Санкт-Петербург  
**Ризнык Андрей Владимирович**, ген. директор ОАО «Системы управления», г. Москва  
**Сигов Александр Сергеевич**, академик РАН, президент МГТУ МИРЭА, г. Москва  
**Суворов Александр Евгеньевич**, ген. директор ФГУП «МКБ «Электрон», г. Москва  
**Турилов Валерий Александрович**, ген. директор ОАО «КНИИТМУ», к.т.н., доцент, г. Калуга  
**Федоров Игорь Борисович**, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана, академик РАН, д.т.н., профессор, г. Москва  
**Чаплыгин Юрий Александрович**, ректор МГИЭТ (ТУ МИЭТ), чл.-корр. РАН, г. Зеленоград  
**Шахнович Илья Владимирович**, шеф-редактор ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», г. Москва  
**Шубарев Валерий Антонович**, ген. директор ОАО «Авангард», д.т.н., профессор, г. Санкт-Петербург  
**Якунин Александр Сергеевич**, ген. директор ОАО «Объединенная приборостроительная корпорация», г. Москва



# МИР

## радиоэлектроники

Й. Эйкхофф

Бортовые компьютеры,  
программное обеспечение  
и полетные операции.  
Введение

Перевод с английского  
Е.Б. Махияновой

под редакцией  
к.э.н. А.А. Адамова

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2014



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

Издание осуществлено при поддержке  
ЗАО НТЦ «Модуль»

УДК 629.78 + 004  
ББК 39.66 + 32.973  
Э30

Э30 Эйкхофф Йенс

**Бортовые компьютеры, программное обеспечение и полетные операции.**

**Введение**

**Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 344 с., ISBN 978-5-94836-388-2**

В этой книге достаточно подробно описывается широкий спектр важных аспектов разработки и эксплуатации спутников. Освещены вопросы системного подхода в трех направлениях: разработке бортовых компьютеров, бортового программного обеспечения и принципов эксплуатации спутников, а также их взаимосвязи. Книга стала результатом написания курса лекций, который используется для обучения студентов в Штутгартском университете в течение нескольких лет.

Книга в равной степени может использоваться студентами и профессионалами, специализирующимися во многих инженерных дисциплинах. Она подходит и как вводный курс, и как справочное руководство для современного системного проектирования.

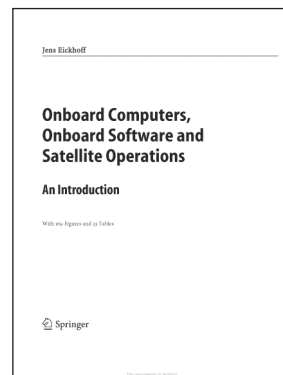
*Translation from English language edition:*  
Onboard Computers, Onboard Software  
and Satellite Operations by Jens Eickhoff

**УДК 629.78 + 004**  
**ББК 39.66 + 32.973**

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012  
Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer  
Science+Business Media  
All Rights Reserved

© 2014, ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»,  
перевод на русский язык, оригинал-макет,  
оформление

**ISBN 978-5-94836-388-2**  
**ISBN 978-3-642-25169-6 (англ.)**



# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие редактора перевода . . . . .	10
Предисловие . . . . .	12
От автора . . . . .	13
Благодарности . . . . .	14
Список сокращений и аббревиатур . . . . .	16

## ЧАСТЬ I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Глава 1. Введение . . . . .	24
1.1. Аспекты проектирования . . . . .	25
1.2. Бортовые компьютеры и каналы передачи данных . . . . .	27
Глава 2. Анализ и проектирование полетного задания и космического аппарата . . . . .	29
2.1. Стадии и задачи разработки космических аппаратов . . . . .	29
2.2. Фаза А — анализ полетного задания . . . . .	31
2.3. Стадия В — техническая проработка проекта космического аппарата . . . . .	33
2.4. Стадия С — уточнение проекта космического аппарата . . . . .	37
2.5. Стадия D — производство летной модели космического аппарата . . . . .	39
2.5.1. Выбор стартовой позиции и ракеты-носителя . . . . .	40
2.5.2. Производство запуска и вывода на начальную орбиту . . . . .	41
2.5.3. Замораживание проектирования бортового программного обеспечения и оборудования . . . . .	42

## ЧАСТЬ II. БОРТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ

Глава 3. История развития бортовых компьютеров . . . . .	46
3.1. Бортовые компьютеры пилотируемых космических аппаратов . . . . .	47
3.1.1. Программа NASA Mercury . . . . .	47
3.1.2. Программа NASA Gemini . . . . .	49
3.1.3. Программа NASA Apollo . . . . .	57
3.1.4. Программа космических кораблей многоразового использования . . . . .	61
3.2. Бортовые компьютеры спутников и космических зондов . . . . .	63
3.2.1. Поколение цифровых секвенсоров . . . . .	63

3.2.2. Бортовые компьютеры на основе транзисторов и память CMOS . . . . .	65
3.2.3. Микропроцессоры космического зонда . . . . .	68
3.2.4. Процессоры MIL и язык программирования Ada . . . . .	72
3.2.5. Бортовые процессоры и операционные системы для RISC-компьютеров. . . . .	74
3.2.6. Современная технология. Системы на кристалле. . . . .	79
3.3. Бортовые компьютеры отдельных космических программ . . . . .	83
Глава 4. Основные элементы бортового компьютера . . . . .	84
4.1. Процессоры и архитектура высокого уровня . . . . .	87
4.2. Компьютерная память. . . . .	89
4.3. Шины данных, сети и двухточечные соединения . . . . .	92
4.3.1. Соединения элементов оборудования бортовых компьютеров . . . . .	92
4.3.2. Стандарт MIL-STD-1553B . . . . .	93
4.3.3. Стандарт SpaceWire . . . . .	95
4.3.4. Интерфейсная CAN-шина . . . . .	97
4.4. Транспондерный интерфейс . . . . .	97
4.5. Бортовой дешифратор командных сигналов космического аппарата (Command Pulse Decoding Unit). . . . .	100
4.6. Устройства реконфигурации резервируемых блоков . . . . .	101
4.7. Интерфейсы отладки и обслуживания . . . . .	103
4.8. Электропитание . . . . .	106
4.9. Оборудование для терморегулирования . . . . .	107
Глава 5. Механическая конструкция бортового компьютера. . . . .	108
Глава 6. Разработка бортовых компьютеров. . . . .	111
6.1. Философия моделирования бортовых компьютеров . . . . .	111
6.2. Процесс производства бортовых компьютеров . . . . .	116
Глава 7. Специальные бортовые компьютеры . . . . .	118
<b>ЧАСТЬ III. БОРТОВОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ</b>	
Глава 8. Статическая архитектура бортового программного обеспечения . . . . .	122
8.1. Функции бортового программного обеспечения . . . . .	122
8.2. Уровень операционной системы и драйверов . . . . .	126
8.3. Вспомогательное оборудование (обработчики) для управления нагрузкой и пулом данных бортового ПО . . . . .	128
8.4. Уровень приложений. . . . .	130

8.5. Взаимодействие бортового ПО с наземными станциями управления . . . . .	132
8.6. Архитектура сервисов бортового ПО . . . . .	139
8.7. Маршрутизация телеуправления и первоочередных команд . .	153
8.8. Телеметрия по нисходящей линии связи и мультиплексирование . . . . .	156
8.9. Заглушка сервисного интерфейса (SIF) . . . . .	158
8.10. Обнаружение, изоляция и восстановление отказов (неисправностей) . . . . .	160
8.11. Ядро бортового ПО . . . . .	163
Глава 9. Динамическая архитектура бортового программного обеспечения	165
9.1. Внутреннее планирование задач. . . . .	165
9.2. Планирование сбора данных, поступающих из информационных каналов. . . . .	168
9.3. Обработка данных системы FDIR . . . . .	172
9.4. Процедуры бортового управления . . . . .	174
9.5. Поддержка сервисного интерфейса данных . . . . .	176
Глава 10. Разработка бортового программного обеспечения . . . . .	177
10.1. Функциональный анализ бортового программного обеспечения . . . . .	177
10.2. Определение требований к бортовому программному обеспечению . . . . .	180
10.3. Дизайн программного обеспечения . . . . .	182
10.3.1. Технология структурного анализа и проектирования . .	185
10.3.2. Иерархическое объектно-ориентированное проектирование . . . . .	188
10.3.3. Унифицированный язык моделирования — UML (Unified Modeling Language) . . . . .	189
10.4. Реализация и кодирование программного обеспечения . . . . .	199
10.5. Верификация и тестирование программного обеспечения . .	200
10.5.1. Испытательный стенд для функциональной верификации (FVB — Functional Verification Bench). . . . .	203
10.5.2. Испытательный стенд для верификации программного обеспечения (SVF) . . . . .	205
10.5.3. Гибридный испытательный стенд для тестирования систем (STB — System Testbed) . . . . .	210
10.5.4. Электрическая функциональная модель (EFM — Electrical Functional Model) . . . . .	215

10.5.5. Последовательность тестирования бортового программного обеспечения . . . . .	218
Глава 11. Процессы разработки бортового программного обеспечения и регламентирующие их стандарты . . . . .	220
11.1. Обзор стандартов программирования . . . . .	220
11.2. Классификация программного обеспечения по уровню критичности . . . . .	225
11.3. Пример применения стандарта программного обеспечения. . . . .	226

#### **ЧАСТЬ IV. ЭКСПЛУАТАЦИЯ СПУТНИКОВ**

Глава 12. Типы полетных заданий и задачи эксплуатации космических аппаратов . . . . .	236
Глава 13. Концепция эксплуатации космического аппарата . . . . .	240
13.1. Концепция управляемости космического аппарата . . . . .	242
13.2. Концепция управления конфигурацией космического аппарата . . . . .	242
13.3. Концепция соответствия технических характеристик требованиям стандарта PUS . . . . .	244
13.4. Концепция определения идентификаторов бортовых процессов . . . . .	246
13.5. Концепция планирования задач и принимающего канала данных . . . . .	247
13.6. Концепция режимов космического аппарата . . . . .	248
13.6.1. Этапы эксплуатации . . . . .	248
13.6.2. Режимы систем и подсистем . . . . .	249
13.6.3. Состояние оборудования при различных режимах эксплуатации спутника . . . . .	254
13.7. Расписание (сроки выполнения) полетного задания . . . . .	254
13.7.1. Расписание LEOP . . . . .	255
13.7.2. Расписание на этапе ввода в эксплуатацию . . . . .	257
13.7.3. Расписание этапа выполнения штатных операций . . . . .	258
13.8. Концепция эксплуатационных последовательностей космических аппаратов . . . . .	259
13.9. Концепция системной аутентификации . . . . .	263
13.10. Концепция наблюдаемости космического аппарата . . . . .	264
13.11. Концепция синхронизации бортовых функций, сбора научных данных и результатов проверки бортовых систем (datation). . . . .	267



13.12. Концепция управления научными данными . . . . .	270
13.13. Концепция восходящей и нисходящей линий связи . . . . .	271
13.14. Концепция автономности космического аппарата . . . . .	274
13.14.1. Определения и классификации . . . . .	274
13.14.2. Реализации автономности и ее цели . . . . .	277
13.14.3. Выводы из реализации автономности . . . . .	278
13.15. Концепция резервирования . . . . .	280
13.16. Концепция FDIR . . . . .	284
13.16.1. Требования к FDIR . . . . .	284
13.16.2. Подход FDIR . . . . .	285
13.16.3. FDIR и иерархия системы безопасности . . . . .	287
13.16.4. Реализация безопасного режима . . . . .	288
13.17. Ограничения спутниковых операций . . . . .	291
13.18. Правила производства полетов и тестирования . . . . .	292
Глава 14. Инфраструктура полетных операций . . . . .	300
14.1. Инфраструктура полетных операций . . . . .	300
14.2. Вспомогательная инфраструктура . . . . .	307
Глава 15. Ввод спутника в эксплуатацию . . . . .	311
15.1. Подготовка полета . . . . .	311
15.2. Запуск и мероприятия этапа LEOP . . . . .	314
15.3. Ввод в эксплуатацию платформы и приборов полезной нагрузки . . . . .	319
Приложения. Примеры реализации автономности космических аппаратов	322
Автономность компонентов бортовых аппаратных средств и программного обеспечения . . . . .	322
Технологии улучшения процессов для оптимизации методов получения результатов выполнения полетного задания . . . . .	323
Высокоэффективные технологии — автономное бортовое ПО зондов для исследования дальнего космоса . . . . .	327
Литература . . . . .	330
Предметный указатель . . . . .	337

## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Выход в русском переводе книги Йенса Эйкхоффа «Бортовые компьютеры, программное обеспечение и полетные операции. Введение» представляет большой интерес для российских специалистов, работающих в области бортовых компьютерных систем. Хотелось бы выделить два принципиально важных момента.

Первый — с точки зрения методического подбора и изложения материала. Точность и четкость структурирования излагаемых положений свидетельствуют не только о большой педагогической практике автора, но и о большом его конструкторском опыте. Подкупает предельная ясность последовательности и объема планируемых операций и функций, которые необходимо реализовать на каждой стадии процесса разработки подсистем космических аппаратов и аппаратов в целом, их эксплуатации. Как учебное пособие материал, безусловно, будет положительно воспринят российскими студентами профильных вузов, а также молодыми специалистами, приступающими к разработке космической техники.

Второй момент связан с попыткой автора скомплексировать три основные задачи, которые вынужден решать разработчик космического аппарата. Это задачи: разработки бортового компьютера спутника и бортового программного обеспечения, разработки принципов работы (концепции) космического аппарата.

Сам автор признает: «...Не было никаких литературных источников, посвященных разработке системной взаимозависимости между этими тремя темами». Думается, системный подход при разработке бортовых систем управления космических аппаратов, построенных на основе бортовых вычислительных комплексов, является базовым методологическим инструментом. В отечественной практике он нашел практическое применение с первых шагов создания бортовых вычислительных комплексов, и, более того, уже много лет он закреплен в фундаментальных нормативных документах.

К сожалению, в силу ряда объективных и субъективных причин в рассматриваемой книге совершенно не нашел отражение опыт, наработанный в Советском Союзе и Российской Федерации в области подходов и методического обеспечения при создании и эксплуатации космической техники, в том числе бортовых вычислительных машин. Это в значительной степени обогатило бы и методологическую часть и позволило бы расширить кругозор студентов, изучающих вопросы разработки спутниковых бортовых компьютеров в совокупности с бортовым программным обеспечением. А без изложения исторического пути, пройденного отечественной промышленностью в процессе

разработки и испытаний в космосе бортовых компьютерных систем управления, создается ощущение незаконченности и отсутствия полноты излагаемого материала в разделе «История развития бортовых компьютеров». И это действительно так. Богатейший опыт в этой области имеют предприятия российской космической отрасли: РКК «ЭНЕРГИЯ» им. С.П. Королева, «ИСС им. академика М.Ф. Решетнева», «НПО им. С.А. Лавочкина» и другие. В кооперации с ними работает и наше предприятие. Нами наработан обширный опыт создания, наземной экспериментальной отработки и непосредственной эксплуатации бортовых компьютеров.

Представляется, что информация по отечественным разработкам существенным образом могла бы дополнить содержание главы 3 части II «Бортовые компьютеры». Очевидная польза от такого взаимного проникновения была бы как для иностранных, так и для отечественных специалистов, обучающихся и работающих в данной области компетенций. В книге наши специалисты найдут много интересного для себя. К примеру, весьма интересен подэтап «Замораживание проектирования бортового программного обеспечения и оборудования». Для разработчиков бортового программного обеспечения крайне важно на завершающем этапе провести комплексный анализ всех стыковочных узлов, в том числе и с характеристиками целевой нагрузки (в транскрипции автора «характеристиками инструментов нагрузки»). В то же время отечественная практика могла бы существенным образом обогатить «Часть IV. Эксплуатация спутников» в подходах формулирования задач эксплуатации и формирования концепции эксплуатации космических аппаратов.

Современные интеграционные процессы предполагают разработку и поставку аппаратуры не только на отечественный, но и на международный рынок. Развивается международное сотрудничество, в частности с Европейским космическим агентством. Несомненно, знакомство с концептуальными подходами в проектировании, разработке космических аппаратов, их вычислительной среды и программного обеспечения представляет большой интерес для наших студентов, специалистов и менеджеров, поскольку имеется много специфического и отличного от нашего в подходах проектирования на американских и европейских фирмах.

Думается, представляемая книга будет полезна не только студентам профильных вузов, но и специалистам, работающим в области космической техники и бортовых вычислительных систем.

Генеральный директор ЗАО НТЦ «Модуль»  
кандидат экономических наук  
*Андрей Анатольевич Адамов*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Направления проектирования спутников всегда определялись целью их эксплуатации, поэтому нагрузка и ее инфраструктура, интегрированная в конструкцию спутника, должны были удовлетворять поставленным задачам и в некоторых случаях имели определенную автономию. «Мозгом» спутника является *бортовой компьютер* с бортовым программным обеспечением, который должен обеспечивать функционирование всех систем, выполнение операций и обслуживание, направленное на подготовку к выполнению поставленных задач. Наконец, успешное выполнение *полетных операций* возможно только при наличии оптимальной взаимосвязи космического и наземного сегментов посредством соответствующей обработки и управления потоком данных.

Существует множество примеров, в которых гибкость операционной системы спутника определяла провал или успех всего полета космического аппарата. Абсолютно неожиданное развитие событий во время полета или отказа бортовых систем — распространенная ситуация во время эксплуатации научных или исследовательских спутников. Спутники связи также нуждаются в надежных и гибких бортовых системах, как это показало поразительное восстановление работы европейского спутника Artemis в 2003 году, когда через 18 месяцев, в момент возобновления работы всех систем, появилась возможность вывести этот спутник на заданную орбиту. Кроме того, выполнение новых правил относительно запрета космического мусора и вывода с орбиты спутников, отработавших свой срок службы, требует надежных и гибких бортовых компьютерных систем, которые должны сохранять эксплуатационные характеристики до самого конца срока службы спутника, даже когда некоторые важные компоненты космического аппарата, такие как гироскоп, уже не работают.

Эта книга называется *«Бортовые компьютеры, программное обеспечение и полетные операции. Введение»* и достаточно подробно описывает широкий спектр важных аспектов разработки и эксплуатации спутников. Мы знаем, что это первая книга, полностью описывающая всю тему проектирования спутников, включая взаимосвязь отдельных направлений разработки их систем. Она стала результатом написания курса лекций, который использовался и используется для обучения студентов в Штутгартском университете в течение нескольких лет. Эта книга в равной степени может использоваться студентами и профессионалами, специализирующимися во многих инженерных дисциплинах. Она подходит как вводный курс, а также как справочное руководство для современного системного проектирования.

*Сентябрь 2011 года*

*Профессор, доктор Ганс-Петер Резер, исполнительный директор Института космических систем Штутгартского университета*

*Профессор, доктор Фолькер Либег, руководитель программ наблюдения Земли Европейского космического агентства*

## ОТ АВТОРА

После приглашения в институт космических систем Штутгартского университета в качестве производственного консультанта и преподавателя по системному проектированию в проект по разработке малого спутника Flying Laptop («Летающий ноутбук»), начатый в 2009 году, я был вынужден решать задачи разработки:

- разработка бортового компьютера спутника;
- бортового программного обеспечения;
- разработка принципов работы (концепции) космического аппарата.

Источниками трудностей при их решении были не сложность космического аппарата и не отсутствие доступных промышленных технологий. Проблема заключалась в том, что ни одна из этих тем до сих пор не рассматривалась в каком-либо курсе лекций в Штутгартском университете и не существовало никакой адекватной вводной литературы для студентов, которую они смогли бы изучить, прежде чем приступить к решению таких сложных инженерных задач спутниковой программы. В частности, не было никаких литературных источников, посвященных разработке системной взаимозависимости между этими тремя темами. Таким образом, все студенты и аспиранты должны были проходить подготовку одновременно с ведущимися процессами проектирования, разработки и верификации работы космического аппарата.

Эта ситуация стала источником для создания курса лекций, предназначенных для освещения системного подхода во всех трех указанных выше направлениях: разработке бортовых компьютеров, бортового программного обеспечения и принципов эксплуатации спутников, а также их взаимосвязи. Лекции были высоко оценены, и после двух лет улучшений их рукопись была принята для публикации в качестве учебного пособия.

Повышенный интерес студентов и спрос на исследования по данным темам в рамках диссертаций, дипломных работ, докторских диссертаций вместе с шансом получить практический опыт работы во время участия в институтском проекте со всей очевидностью подтвердили необходимость этого курса лекций. Я надеюсь, что эта книга послужит хорошим источником базовых знаний для студентов, позволит им улучшить свой профессионализм в таких сложных областях, как разработка спутниковых бортовых компьютеров и бортового программного обеспечения, или проектирование контроллера полезной нагрузки, или эксплуатация космических аппаратов.

*Имменштад (Бодензее), 2011 год  
Йенс Эйкхофф*

## БЛАГОДАРНОСТИ

Эта рукопись охватывает широкий спектр технологических аспектов и не обрела бы такой образовательный потенциал без присутствия высококачественного графического материала, полученного из профессиональных источников — с производства и от аэрокосмических агентств. Поэтому здесь я имею счастливую возможность поблагодарить за предоставленные рисунки и фотографии следующие организации:

- институт космических систем, университет Штутгарта, Германия;
- центр космических операций ESA/ESOC (ESA/ESOC — Европейского космического агентства / Европейского центра космических операций), Дармштадт, Германия;
- Astrium GmbH — Satellites, Фридрихсхафен, Германия;
- Aeroflex, Колорадо-Спрингс. США;
- Aeroflex Gaisler, Гётеборг, Швеция;
- RUAG Aerospace Sweden AB, Гётеборг, Швеция;
- BAE Systems, Манассас, США;
- Германский аэрокосмический центр DLR/GSOC, Оберпфaffenхофен, Германия;
- Jena Ortronik GmbH, Йена, Германия.

Все материалы, полученные из производственных организаций и используемые в тексте книги, приводятся в соответствии с источником и авторскими правами.

Все общедоступные материалы, взятые с веб-сайтов ESA и NASA (NASA — National Aeronautics and Space, национальное агентство по авионавигации и исследованию космического пространства), используются в соответствии с авторскими правами и условиями использования, указанными, например, в письме от [multimedia@esa.int](mailto:multimedia@esa.int), и также в соответствии с информацией владельца авторских прав. Рисунки и фотографии, использование которых регулируется GFDL (GFDL — GNU Free Documentation License, лицензия свободной документации GNU) или Creative Commons License, взяты из «Википедии» и также приведены согласно правилам лицензий.

В начале этой книги я хочу выразить особую признательность профессору, доктору Фолькеру Либигу, который стал инициатором в предоставлении мне графического и фотоматериала от ESA об эксплуатации спутников для глав 14 и 15, а также Нику Мардлу, руководителю производства космического аппарата CryoSat в ESOC, за тщательный отбор соответствующего материала, который оптимально дополняет текст.

Кроме того, я хотел бы выразить свою благодарность профессору доктору Хансу-Петеру Резеру из института космических систем, который в 2003 году привлек меня к сотрудничеству в качестве приглашенного лектора и в 2009 году пригласил как производственного консультанта по системному проектированию в проект малого спутника FLP, и моему руководителю в EADS Astrium в Фридрихсхафене Эххарду Сеттельмейеру за поддержку во время этой внештатной учебной деятельности.

Я очень многим обязан Дэйву Т. Хэслэму, который выполнил корректуру книги как носитель английского языка.

В Springer-Venag GmbH по всем вопросам создания макета книги и другим проблемам, которые обычно возникают у автора при публикации в издательстве, меня всеми силами поддерживали мадам Кармен Вулф и доктор Кристоф Бауман. Особую благодарность хочу выразить доктору Бауману за рассмотрение моих предложений по оформлению обложки.

Наконец, я хочу поблагодарить мою семью и особенно мою жену за ее поддержку и мотивацию, а также за то, что она терпеливо сносила в течение многих вечеров мое сидение перед компьютером, когда я только начинал формировать курс этих лекций, а потом — когда писал эту книгу.

Благодарю всех за оказанную мне поддержку.

*Йенс Эйкхофф*

# СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И АББРЕВИАТУР

## Технические сокращения

AACS	Attitude and Articulation Control Subsystem	Подсистема управления угловой ориентацией и шарнирными соединениями
AES	Advanced Encryption Standard	Усовершенствованный (улучшенный, новый, симметричный) стандарт шифрования
AFT	Abbreviated Function Test	Сокращенный функциональный тест
AGC	Apollo Guidance Computer	Счетно-решающий вычислитель для космических аппаратов Apollo
AIT	Assembly, Integration and Test	Сборка, монтаж и испытания
ANSI	American National Standards Institute	Американский национальный институт стандартов (США)
AOCS	Attitude and Orbit Control System	Система управления угловой ориентацией и орбитой
APID	Application Process Identifier	Идентификатор приложения
ASIC	Application Specific Integrated Circuit	Интегральная схема специального назначения
ATV	Autonomous Transfer Vehicle	Автономный транспортный космический аппарат
BC	Bus Controller	Контроллер шины
BGA	Ball Grid Array	Массив шариковых выводов
BIOS	Basic Input/Output System	Базовая система ввода/вывода (программно-аппаратный узел персональной ЭВМ)
CADU	Channel Access Data Unit	Блок выдачи данных о доступе к каналу
CAN	Controller Area Network	Интерфейс CAN
CASE	Computer-Aided Software Engineering	Автоматизированная разработка программного обеспечения
CCD	Charge-Coupled Device	Прибор с зарядной связью
CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems	Международный консультативный комитет по космическим системам передачи данных
CDMU	Control and Data Management Unit	Блок контроля и управления данными
CDR	Critical Design Review	Анализ технического проекта
CDS	Command and Data Subsystem	
CGS	Common Ground Software	Базовое наземное программное обеспечение
CISC	Complex Instruction Set Computer	Компьютер с полным набором команд (CISC-компьютер)
CLTU	Command Link Transfer Unit	Блок передачи командной линии связи
CM	Apollo Command Module	Командный модуль космических аппаратов Apollo
CPU	Central Processing Unit	Центральный процессор
CRC	Cyclic Redundancy Check	Циклический избыточный код
CSDS	Columbus Software Development Standard	Стандарт на разработку программного обеспечения для космических аппаратов Columbus
DAL	Development Assurance Levels	Уровни обеспечения качества разработки ПО



DBUM	Data Management Bulk Memory Unit	Блоки памяти для управления обработкой данных
DDF	Design Definition File	Файл описания проекта
DDR	Detailed Design Review	Подробный анализ рабочего проекта
DHS	Data Handling System	Бортовая подсистема обработки данных
DJF	Design Justification File	Файл описания проекта
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	Германский центр авиации и космонавтики
DMA	Direct Memory Access	Прямой доступ к памяти
DMAC	Direct Memory Access Controller	Контроллер прямого доступа к памяти (контроллер DMA)
DORIS	Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite	Доплеровская спутниковая орбитография и радиолокация корабля многоразового использования
DPS	Shuttle Data Processing System	Система обработки данных шаттлов
DRD	Document Requirement Definition	Требования к оформлению документов
DRL	Documents Requirements Lists	Списки требований к документации
DSP	Digital Signal Processor	Цифровой сигнальный процессор
DSU	Debug Support Unit	Отладочный вспомогательный блок
EBB	Elegant Breadboard	Простой функциональный макет
ECC	ESTRACK Control Center	Центр управления ESTRACK
ECLSS	Environmental Control and Life Support System	Электронная система регулирования окружающей среды и обеспечения жизнедеятельности
ECSS	European Cooperation for Space Standardization	Европейская организация по стандартизации в области космической деятельности
EDAC	Error Detection and Correction	Обнаружение и исправление ошибок
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory	Электрически стираемая программируемая постоянная память (ЭППЗУ)
EFM	Electrical Functional Model	Электрическая функциональная модель
EGSE	Electrical Ground Support Equipment	Наземное вспомогательное электрооборудование
EGSE	Electrical Ground Support Equipment	Наземное вспомогательное электрооборудование
EM	Engineering Model	Инженерная модель
EMC	Electromagnetic Compatibility	Электромагнитная совместимость в условиях космоса
EQM	Engineering Qualification Model	Инженерная модель для контрольных испытаний
ESA	European Space Agency	Европейское космическое агентство
ESD	Electrostatic Discharge	Электростатический разряд
ESOC	ESA Space Operations Centre	Европейский центр управления космическими полетами
ESTRACK	ESA Tracking Network	Сеть слежения ESA
FAA	Federal Aeronautics Association	Федеральная ассоциация авиации США
FAR	Flight Acceptance Review	Летная приемочная проверка
FDIR	Failure Detection, Isolation and Recovery	Выявление, изоляция и восстановление отказов на космическом аппарате
FDS	Flight Data Subsystem	Подсистема полетных данных

FM	Flight Model	Летная модель
FOC	Flight Operations Center	Центр управления полетами
FOCC	Flight Operations Control Center — ESOC Terminology — See FOC	Оперативный центр обеспечения и контроля полетов (терминология ECOS), см. также FOC
FOD	Flight Operations Director	Руководитель полетов
FOG	Fiber-Optic Gyro	Волоконно-оптический гироскоп
FOM	Flight Operations Manual, also called SSUM	Руководство по обеспечению полетов
FOS	Flight Operations Segment ESOC control Infrastructure including antenna stations	Сегмент управления инфраструктурой ESOC, включая антенны станций
FPGA	Field Programmable Gate Array	Программируемая пользователем вентиляционная матрица (ПЛИС)
FVB	Functional Verification Bench	Испытательный стенд для функциональной верификации
G/S	Ground Station	Наземная станция
GCS	Ground Control Segment	Наземный сегмент управления
GDC	Gemini Digital Computer	Цифровая ЭВМ космического аппарата Gemini
GEO	Geostationary Earth Orbit	Геостационарная орбита
GFDL	GNU Free Documentation License	Лицензия свободной документации GNU
GMES	Global Monitoring for Environmental Security	Глобальный мониторинг для безопасности окружающей среды
GMS	Ground Mission Segment	Наземный сегмент управления полетом
GOCE	Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer	Исследователь гравитационного поля и установившихся океанских течений
GOM	Ground Operations Manager	Руководитель операций подготовки к запуску
GPL	GNU Public License	Общедоступная лицензия GNU
GPS	Global Positioning System	Система глобального позиционирования
GSWS	Galileo Software Standard	Стандарт на разработку программного обеспечения космического аппарата Galileo
HALS	Highlevel Assembler Language Shuttle	Язык ассемблера высокого уровня / шаттл
HITL	Hardware in the Loop	Циклическое тестирование аппаратных средств
HK	Housekeeping	Проверка бортовых систем
HOOD	Hierarchic Object-Oriented Design	Иерархическое объектно-ориентированное проектирование
HPC	High Priority Command	Команда с высшим приоритетом
HPTM	High Priority Telemetry	Телеметрия с высшим приоритетом
HW	Hardware	Оборудование
I/O	Input/Output	Вход/выход
IC	Integrated Circuit	Интегральная схема (ИС)
ICD	In Circuit Debugger	Интегрированный отладчик
ICU	Instrument Control Unit	Инструмент управления компьютера
IDEF	Integration DEFinition Method	Метод описания интеграции
IF	Interface	Интерфейс

IRD	Interface Requirements Document	Документация со списком требований к интерфейсам
IRR	Integration Readiness Review	Анализ интеграции программного обеспечения
IRS	Institut für Raumfahrtssysteme, Institute of Space Systems. University of Stuttgart, Germany	Институт космических систем, Штутгартский университет, Германия
ISSR	Integrated Solid State Recorder	Интегрированный твердотельный регистратор
ISVV	Independent Software Verification and Validation	Независимая верификация и валидация программного обеспечения
IVI	Incremental Velocity Indicator	Индикатор приращения скорости
JOVIAL	Jules Own Version of the International Algorithmic Language	Язык программирования Jovial
JTAG	Joint Test Actions Group	Интерфейс JTAG
LCB	Line Control Block	Блок управления каналом
LCL	Latch Current Limiter	Модуль ограничителя тока
LED	Light Emitting Diode	Светодиод
LEO	Low Earth Orbit	Низкая околоземная орбита
LEOP	Launch and Early Orbit Phase	Этап запуска и вывода на начальную орбиту
LGPL	Lesser GNU Public License	Общедоступная лицензия ограниченного применения GNU
LM	Apollo Lunar Module	Лунная модель космического аппарата Apollo
LVDS	Low Voltage Differential Signal	Дифференциальный сигнал низкого уровня
M&C	Monitoring and Control	Управление и контроль
MAP-ID	Multiplexer Access Point Identifier	Мультиплексорный идентификатор точки доступа
MC	Magnetic Core	Магнитный сердечник
MCR	Main Control Room	Главный зал управления полетными операциями
MCS	Mission Control System	Система управления полетами
MDIU	Manual Data Insertion Unit	Блок ручного ввода данных
MF	Monitoring Facility	Объект мониторинга полетных систем
MMFU	Mass Memory and Formatting Unit	Устройство массовой памяти и форматирования
MMI	Man Machine Interface	Интерфейс человек—машина
MMU	Memory Management Unit	Блок управления памятью (блок MMU)
MSG	MeteoSat 2-th Generation	Метеорологический спутник MeteoSat второго поколения
MTL	Master Timeline (on board)	Основной график работ космического аппарата в полете (на борту)
MTQ	Magnetotorquer	Магнитный серводвигатель
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Национальное агентство по авиации и исследованию космического пространства
NCO	Numerically Controllable Oscillator	Генератор с цифровым программным управлением
NCR	Nonconformance Report	Оценка несоответствия техническим условиям
NRZ	Non Return to Zero	Без возврата к нулю
NTP	Network Time Protocol	Сетевой протокол синхронизации времени
NVRAM	Non Volatile Random Access Memory	Энергонезависимое ОЗУ

OBC	Onboard Computer	Бортовой компьютер
OBSCP	Onboard Control Procedure	Процедура бортового управления
OBDAH	Onboard Data Handling	Бортовая обработка данных
OBSW	Onboard Software	Бортовое программное обеспечение
OBSW-DP	Onboard Software Data Pool	Пул данных бортового программного обеспечения
OBT	Onboard Time	Бортовое время
OIRD	Operations Interface Requirements Document	Нормативная документация, регламентирующая требования к служебному интерфейсу
P/E	Program/Erase (cycle)	Программирование/стирание (цикл)
PA/QA	Product Assurance / Quality Assurance	Гарантия качества продукции
PC	Program Counter	Счетчик программы
PCB	Printed Circuit Board	Печатная плата
PCDU	Power Control and Distribution Unit	Блок регулирования и распределения мощности
PDGS	Payload Data Ground Segment — ESOC Terminology — See PGS	Наземный сегмент обработки данных полезной нагрузки (терминология ECOS), см. PGS
PDHT	Payload Data Handling and Transmission	Передача и обработка данных полезной нагрузки
PDR	Preliminary Design Review	Предварительный анализ проекта
PFM	Proto Flight Model	Прототип летной модели
PGS	Payload Ground Segment	Наземный сегмент полезной нагрузки
PID	Process Identifier (for an OBSW process)	Подпараметр идентификатора процесса (для процесса OBSW)
PL	Payload	Нагрузка
PLS	Plane to Line Switching	Технология «переключение-из-плоскости-в-линию»
PMC	Payload Management Computer	Компьютер управления полезной нагрузкой
PPS	Pulse Per Second	Импульс в секунду
PROBA	Project for Onboard Autonomy	Проект бортовой автономности
PROM	Programmable Read Only Memory	Программируемое постоянное запоминающее устройство (программируемая постоянная память) (ППЗУ)
PRR	Preliminary Requirements Review	Требования к предварительному анализу
PSR	Project Support Room	Зал поддержки проекта
PTC	Parameter Type Codes	Коды типов параметров
PUS	ESA Packet Utilization Standard	Стандарт ESA использования пакетов
QM	Qualification Model	Образец для контрольных испытаний
QR	Qualification Review	Анализ результатов испытаний на соответствие техническим требованиям
RAM	Random Access Memory	Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ)
RB	Requirements Baseline	Основные требования
RF	Radio Frequency	Радиочастота (совокупность частотных диапазонов электромагнитного излучения в пределах, установленных Международным союзом электросвязи ЭМС 3к Гц — 3000 ГГц)

RISC	Reduced Instruction Set Computer	Компьютер с сокращенным набором команд (RISC-компьютер)
RIU	Remote Interface Unit	Устройство удаленного сопряжения
RMAP	Remote Memory Access Protocol	Протокол удаленного доступа к памяти
ROM	Read Only Memory	Постоянное запоминающее устройство (постоянная память) (ПЗУ)
RPF	Reference Planning Facility	Объект справочного планирования
RT	Remote Terminal	Удаленный терминал
RTOS	Realtime Operating System	Операционная система реального времени
RWL	Reaction Wheel	Ротор газовой турбины
S/C	Spacecraft	Космический аппарат
SA	Solar Array	Солнечная батарея
SADT	Structured Analysis and Design Technique	Технология структурного анализа и проектирования
SBC	Single Board Computer	Одноплатный компьютер
SCF	Software Configuration File	Файл конфигурации программного обеспечения
SCOE	Special Checkout Equipment	Специальное контрольно-проверочное оборудование
SCOS	Satellite Control and Operation System	Система управления спутниками
SCV	Spacecraft Configuration Vector	Вектор конфигурации космического аппарата
SDD	Software Design Document	Техническая документация на разработку средств программного обеспечения исходного кода
SDP	Software Development Plan	План разработки программного обеспечения
SEU	Single Event Upset	Сбой в результате единичного события
SID	Structure ID's	Структурные идентификаторы
SIF	Service Interface	Сервисный интерфейс
SIMSAT	Simulation Infrastructure for the Modeling of SATellites	Проектировочная инфраструктура для моделирования спутников
SMD	Surface Mounted Device	Микросхемы поверхностного монтажа
SMI	System Management Interface	Системный интерфейс управления
SoC	System on Chip	Система на кристалле (ЧНК)
SOCD	Spacecraft Operations Concept Document	Документация, регламентирующая правила управления космическим аппаратом
SOM	Spacecraft Operations Manager	Руководитель эксплуатации космического аппарата
SPACON	Spacecraft Controller	Контроллер космического аппарата
SPARC	Scalable Processor Architecture	Архитектура процессоров с изменяемой вычислительной мощностью
SPR	Software Problem Report	Отчет об анализе проблем
SRD	System Requirements Document	Документация, регламентирующая системные требования
SRDB	Satellite Reference Database	Спутниковая справочная база данных
SReID	Software Release Document	Документация готовой версии программного обеспечения
SRevP	Software Review Plan	План анализа программного обеспечения
SRR	System Requirements Review	Анализ системных требований

SRS	Satellite Requirements Specification	Технические требования к космическому аппарату
SS	Space Segment	Космический сегмент
SSR	Solid State Recorder	Твердотельный регистратор
SSS	Software System Specification	Технические требования к системе программного обеспечения
SSUM	Space Segment User Manual, also called FOM	Пользовательское руководство обеспечения работы космического сегмента
SSVF	System Simulation and Verification Facility	Стенд для системной симуляции и верификации
ST	Subservice Type (PUS)	Тип подсервисов (PUS)
STB	System Testbench	Гибридный испытательный стенд для тестирования систем
STR	Star Tracker (sometimes also Star Camera)	Приложение питания для включения датчиков астронавигации
SUITP	Software Unit and Integration Test Plan	Программный модуль и план интеграционного тестирования
SUM	Software User Manual	Руководство пользователя программного обеспечения
SValP	Software Validation Plan	План валидации программного обеспечения
SVerP	Software Verification Plan	План верификации программного обеспечения
SVF	Software Verification Facility	Испытательный стенд для верификации программного обеспечения
SVS	Software Validation Specification	Спецификация валидации программного обеспечения
SVT	System Validation Test	Системный тест по валидации
SW	Software	Программное обеспечение (ПО)
SW-AR	System Acceptance Review	Приемочный анализ ПО
TC	Telecommand	Телеуправление
TCL	Tool Command Language	Командный язык инструментов
TM	Telemetry	Телеметрия
TRL	Technology Readiness Levels	Уровни технологической готовности
TRR	Test Readiness Review	Тестирование для проверки готовности ПО
TUS	Test User Segment	Тестовый пользовательский сегмент
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter	Универсальный асинхронный приемопередатчик
UML	Unified Modeling Language	Унифицированный язык моделирования
USB	Universal Serial Bus	Универсальная последовательная шина
VC	Virtual Channel	Виртуальный канал
WS	Workstation	Рабочее место (рабочая станция)

*Лучший способ предсказать будущее — это создать его.*  
*Алан Кей*

# ЧАСТЬ I ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

# ГЛАВА I

## ВВЕДЕНИЕ



Зонд Rosetta и спускаемый аппарат Philae. © ESA

Несмотря на то, что предназначение нагрузки, например, спутникового радара или оптических инструментов является основной движущей силой при создании космических аппаратов, функциональность платформы управления играет важную роль в эффективном выполнении их полетного задания. Учитывая такие ключевые характеристики, как увеличение точности геолокационных данных, требуемых нагрузке для выполнения своей задачи по наблюдению поверхности Земли, требования к функциональности спутниковой платформы управления растут опережающими темпами. Та же тенденция прослеживается при разработке особых полетных заданий, например измерения гравитационного поля Земли для дальних космических полетов и новейших концепций наблюдения Земли с геостационарной орбиты.

Функциональность платформы управления главным образом определяется функциональностью бортового программного обеспечения (OBSW — On-board Software) и эксплуатационной гибкостью его наземного управления, что основано на функциях и особенностях бортового программного обеспечения. Производительность самого бортового программного обеспечения соответственно ограничена производительностью имеющегося бортового компьютера (OBC — Onboard Computer) и аппаратных средств. Таким образом, обеспечение управляемой с земли цепочки операций космических аппаратов, включая работу OBSW, платформы управления, устройств нагрузки через аппаратуру OBC, является ключевой задачей системного проектирования современных спутников.



## 1.1. Аспекты проектирования

При создании космических аппаратов разработка первоначальных требований к проектированию, однако, не охватывает детали, касающиеся бортового компьютера, программного обеспечения или эксплуатационных процедур и т.д. Основные требования к полетному заданию космического аппарата на стадии разработки спутника В/С/D устанавливаются в двух ключевых документах, а именно:

- документации, регламентирующей системные требования (SRD — System Requirements Document);
- регламентирующих требования в нормативной документации к служебному интерфейсу (OIRD — Operations Interface Requirements Document).

SRD включает в себя технические требования как космическому, так и наземному сегменту миссии. OIRD охватывает требования к эксплуатации космического аппарата с земли.

Производитель космических аппаратов на основе этих первичных документов разрабатывает набор производных требований, которые сосредоточены исключительно на функциях космического аппарата в так называемых «Технических требованиях к космическому аппарату» (SRS — Satellite Requirements Specification). Таким образом, SRS содержит проектные и эксплуатационные требования ко всему оборудованию космического аппарата, его функциональности и производительности, среди которых выделены особо следующие требования:

- к инструментам/нагрузке;
- системе управления угловой ориентацией и орбитой (AOCS — Attitude and Orbit Control System), проектированию и производительности этой системы;
- подсистеме питания и ее управлению;
- тепловой подсистеме и ее управлению;
- бортовой подсистеме обработки данных (DHS — Data Handling System);
- выявлению, изоляции и восстановлению отказов на космическом аппарате (FDIR — Failure Detection, Isolation and Recovery);
- совместимости с наземным сегментом.

Это базовая проектная документация разработки космического аппарата, в неявном виде она служит для формирования требований к проектированию бортового программного обеспечения для управления космическим аппаратом, во вторую очередь — для разработки требований к бортовому компьютеру и принципам эксплуатации космического аппарата. Разработка во всех трех направлениях должна вестись параллельно, дополняя друг друга в соответствии с конкретными задачами и функциями.

В области разработки бортовых компьютеров, программного обеспечения и принципов эксплуатации нужно принять во внимание ряд аспектов. Бортовые

компьютеры по сравнению с отраслевым стандартом встроенных контроллеров или автомобильных контроллеров должны обеспечивать:

- значительную устойчивость к отказам, которой можно достичь только за счет резервирования;
- электромагнитную совместимость (EMC — Electromagnetic Compatibility) в условиях космоса;
- и, кроме того, устойчивость к излучениям высокоэнергичных частиц.

Последнее требование не может быть удовлетворено путем применения стандартных высокоинтегральных схем (ИС), используемых в современных микропроцессорах персональных компьютеров. Процессоры для космических приложений требуют более низкой плотности интеграции микросхем и большей их специализированности. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению достижимой тактовой частоты процессора (типичные значения — 20–66 МГц). Кроме того, современные бортовые компьютеры все еще должны обслуживать большое количество различных типов интерфейсов, таких как:

- последовательные или LVDS-интерфейсы со стороны транспондера;
- аналоговые интерфейсы и шины данных со стороны платформы и оборудования полезной нагрузки.

И, наконец, все интерфейсные подключения, по крайней мере частично, должны иметь избыточный резерв.

Сходные ограничения также накладываются и на бортовое программное обеспечение спутника. OBSW должно быть:

- управляемым в реальном времени;
- позволять осуществлять как интерактивное дистанционное управление космическим аппаратом, так и автономное управление;
- типичная сегодня концепция бортового программного обеспечения — это обслуживание на основе многоуровневой архитектуры управления и ввода/вывода (I/O) следующих программ:
  - ◇ программы обработки I/O данных и протоколов шины данных,
  - ◇ режимы управления нагрузкой, АОСС, подсистемами терморегулирования и электропитания;
  - ◇ режимы выявления, изоляции и восстановления отказов.

Должны быть подробно представлены следующие группы основных принципов эксплуатации космического аппарата:

- команды и управление нагрузкой и платформой с помощью вышеописанной системы обслуживания на основе бортового программного обеспечения;
- принцип эксплуатации космического аппарата должен быть основан на международных стандартах передачи данных по восходящей/нисходящей линиям;

- телеуправление/телеметрия (ТС/ТМ — Telecommand/Telemetry) OBSW, управление пакетами программ в сервисной архитектуре OBSW должно удовлетворять базовым требованиям заказчика, например стандарту ESA использования пакетов (PUS — Packet Utilization Standard);
- основные принципы полетного задания должны быть разработаны с учетом видимости с наземной станцией, использования сети наземных станций, энергетического бюджета линий связи и оперативного графика наземного управления;
- кроме того, основные принципы эксплуатации должны:
  - ◇ поддерживать наземный контроль всех номинальных функций платформы и полезной нагрузки;
  - ◇ осуществлять наземный контроль при проведении процедур FDIR и восстановительных работ;
  - ◇ позволять осуществлять обновление OBSW, расширение полетных функций и исправление программного обеспечения с земли.

Подробные требования к проектированию бортового программного обеспечения, бортовых компьютеров и космических операций являются результатом анализа полетного задания и сформулированных принципов проекта космического аппарата.

## 1.2. Бортовые компьютеры и каналы передачи данных



Рис. 1.1. Модульный спутник и его бортовые компьютеры

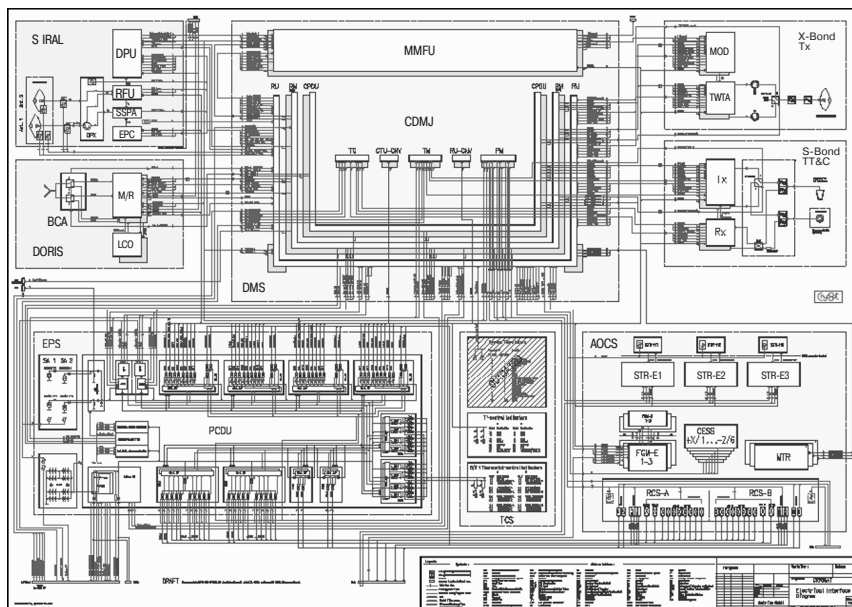


Рис. 1.2. Схема центрального спутникового блока контроля и управления данными.  
© Astnum GmbH

Управление спутниковой платформой обычно выполняется по двунаправленной телекомандной (ТС) / телеметрической (ТМ) радиолинии передачи данных в S-диапазоне (от 2,0 до 2,2 ГГц). Научная нисходящая ТМ-линия (одна-направленная), как правило, работает в X-диапазоне (от 7,25 до 7,75 ГГц). В обеих линиях обычно применяются одни и те же стандартные протоколы передачи данных.

На старых спутниках и космических зондах бортовой компьютер (ОВС) контролировал исключительно спутниковую платформу, для управления оборудованием нагрузки использовался специальный выделенный компьютер (РМС — Payload Management Computer). На новых космических аппаратах в основном один ОВС управляет как платформой, так и оборудованием нагрузки.

Также для хранения результатов проверки бортовых систем и научной телеметрии использовалось устройство массовой памяти и форматирования (MMFU — Mass Memory and Formatting Unit). В случае интеграции MMFU в ОВС такие компьютеры часто называют блоками контроля и управления данными (CDMU — Control and Data Management Unit)

## ГЛАВА 2



Приближение зонда Rosetta к астероиду Stein. © ESA

## АНАЛИЗ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛЕТНОГО ЗАДАНИЯ И КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

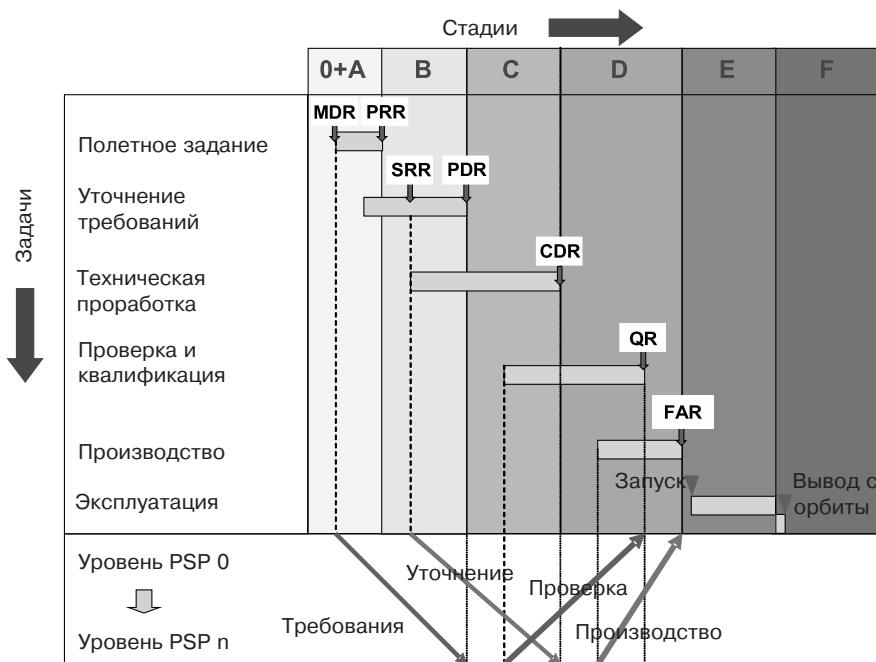
### 2.1. Стадии и задачи разработки космических аппаратов

На рис. 2.1 представлено разбиение на стадии процесса разработки космического аппарата. Под названием каждой стадии перечислены основные задачи, которые должны быть решены в этот период. На рис. 2.2 показан дополнительно

Стадия 0/A		Стадия B/C	Стадия C/D		Стадия E
Оценка решений относительно полетного задания и совместимости нагрузки	Разработка основных принципов (концепции) проекта полета, нагрузки и конструкции космического аппарата	Техническая проработка и проверка основных положений проекта	Производство, сборка, интеграция и испытание		Эксплуатация космического аппарата
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Определение целей и ограничений полета</li> <li>• Определение базового плана полета, а также его альтернатив и вариантов</li> <li>• Анализ минимальных требований</li> <li>• Оценка документации</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Анализ требований к нагрузке</li> <li>• Определение альтернативных концепций нагрузки</li> <li>• Анализ итоговых требований к конструкции космического аппарата, его орбите и траектории полета</li> <li>• Стандартизация документации</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Доводка проекта бортовых систем и проверка элементов всего проекта</li> <li>• Разработка и проверка технических требований к системам и оборудованию</li> <li>• Проектирование функционального алгоритма и проверка эксплуатационных характеристик</li> <li>• Обеспечение проектирования с точки зрения взаимодействия всех участников и бюджетов всех систем</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Привлечение субподрядчиков для производства компонентов космического аппарата</li> <li>• Техническое проектирование компонентов и системной нагрузки</li> <li>• Разработка и тестирование EGSE<sup>1</sup></li> <li>• Разработка и проверка бортового программного обеспечения</li> <li>• Разработка и проверка тестовых процедур</li> <li>• Испытание блоков и подсистем</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Проверка программного обеспечения</li> <li>• Интеграция и испытание систем</li> <li>• Проверка эксплуатационных характеристик и функций</li> <li>• Разработка и проверка полетных процедур</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Проверка работы наземного сегмента</li> <li>• Подготовка операторов</li> <li>• Эксплуатация на орбите</li> <li>• Калибровка оборудования</li> <li>• Оценка эксплуатационных характеристик</li> <li>• Выявление и устранение неполадок космического аппарата генеральным подрядчиком</li> </ul>

Рис. 2.1. Стадии разработки космического аппарата и соответствующие им задачи

<sup>1</sup>Electrical Ground Support Equipment, наземное вспомогательное электрооборудование. — Прим. ред.



**Рис. 2.2.** Стадии разработки космического аппарата и их анализ: PRR (Preliminary Requirements Review) — предварительный анализ требований проекта; SRR (System Requirements Review) — анализ системных требований к проекту; PDR (Preliminary Design Review) — предварительный анализ проекта; CDR (Critical Design Review) — анализ технического проекта; QR (Qualification Review) — анализ результатов испытаний на соответствие техническим требованиям; FAR (Flight Acceptance Review) — летная приемочная проверка. Источник © ECSS-M30A

обзорный график разработки космического аппарата с перечислением основных стадий в соответствии с данными ECSS-E-M30A.

Анализ полетного задания выполняется уже на первой стадии проектирования 0/A. Результатом такого пошагового анализа является разработка требований к наземному и космическому сегментам полета, которые в дальнейшем будут уточнены на стадии B во время анализа PDR. Системное проектирование ОВС, OBSW и разработка основных принципов эксплуатации начинаются после выполнения SRR. Таким образом, в течение стадий A—C и до начала CDR должны быть определены следующие элементы:

- нагрузка космического аппарата и ее функции;
- параметры орбиты / траектории / маневров космического аппарата;
- режимы эксплуатации космического аппарата;
- обязательные АОС и подсистемы платформы;
- используемое бортовое оборудование и его соответствие проекту;
- оборудование связи наземного и космического сегментов;
- мониторинг и управление бортовыми функциями систем и оборудования;

- выполнение точно в срок автономных функций, например запуска и вывода на начальную орбиту (LEOP — Launch and Early Orbit Phase);
- функции FDIR, безопасный режим обработки и т.д.;
- тестовые функции;
- определение функций, которые должны быть реализованы оборудованием в соответствии с командами программного обеспечения.

Все это необходимые факторы при проектировании ОВС и OBSW, высокоуровневых систем и подсистем, а также разработки основных принципов эксплуатации космического аппарата.

## 2.2. Фаза А — анализ полетного задания

Анализ полетного задания необходим для определения орбиты, являющейся оптимальной для следующих целей:

- качественного выполнения задания оборудованием нагрузки;
- выполнения полетного задания в заданные сроки;
- возможных контактов с наземными станциями для осуществления нисходящей связи в рамках полетного задания нагрузки и наземного обслуживания.

Результатом такого анализа является разработка следующих требований:

- сохранение данных о выполнении нагрузкой полетного задания;
- сроки и автономное функционирование бортовых систем;
- энергетический бюджет линий связи.

Из этой элементарной оценки следует определение:

- характеристик приборов нагрузки;
- основных характеристик рабочей орбиты и орбиты/траектории LEOP;
- конструктивных характеристик космического аппарата:
  - ◇ панели солнечных батарей на корпусе (SA), разворачиваемых SA, разворачиваемых антенн;
  - ◇ разворачиваемые компоненты стрелы
  - ◇ и т.д.

Далее следует концептуальное определение требований и выбор технологии для производства основных функциональных компонентов, таких как:

- датчики/приводы подсистем AOCS;
- оборудование подсистемы питания;
- оборудование подсистемы терморегуляции;
- оборудование подсистемы обработки данных.

В итоге производится первое определение:

- элементарных режимов нагрузки;

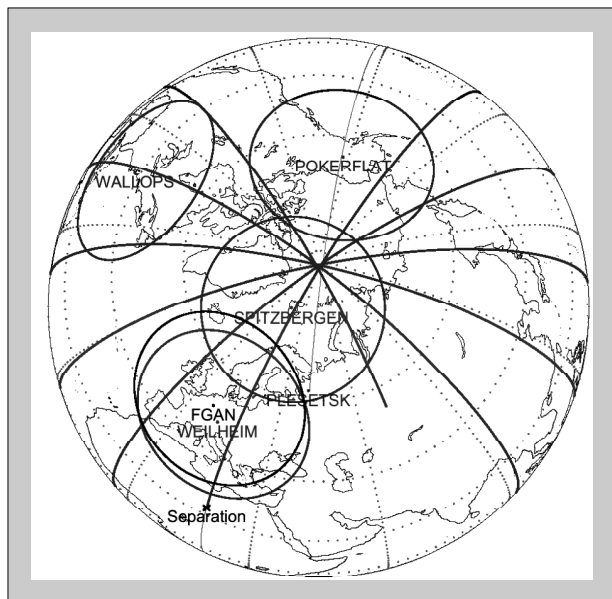


Рис. 2.3. Пример: наземные траектории орбиты LEOP и видимость станциями. © Astnum GmbH

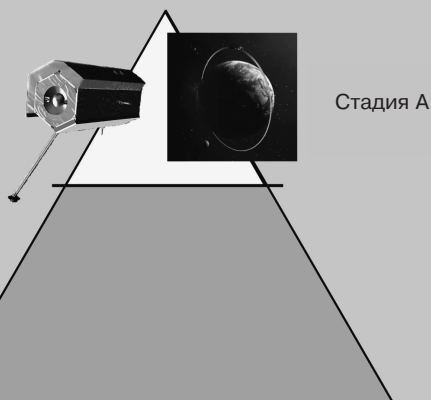
- элементарных режимов эксплуатации космического аппарата;
- плюс данных нефункционального проектирования как оценки бюджетов (массы, мощности).

Следующим должно быть примерное определение требований к каждому из вышеперечисленных функциональных компонентов для всех этапов разработки сверху вниз — по уровням детализации проекта. Все эти компоненты будут впоследствии пересчитываться и уточняться.

Таблица 2.1. Стадия А — область проектирования

Стадия А включает в себя определение следующих направлений проектирования космического аппарата:

- основных принципов полетного задания;
- характеристик основных компонентов космического аппарата;
- начальных функций систем;
- бюджетов космического аппарата;
- примерного проекта режимов и переходов между ними.





## 2.3. Стадия В — техническая проработка проекта космического аппарата

Фаза В представляет собой первую полную техническую проработку проекта на системном уровне. Она включает в себя проведение ряда подробных анализов в различных областях. Не претендуя на полноту, необходимо составить список самых основных видов анализа с учетом их подзадач. Одним из важных предметов анализа является уточнение следующих основных характеристик орбиты:

- параметры номинальной эксплуатационной орбиты;
- параметры переходных орбит и траекторий, включая LEOP-траектории;
- управление маневрами на орбите;
- увод с орбиты — снижение или подъем после окончания срока эксплуатации.

С определениями характеристик орбит, маневрами на орбите и траекториями тесно связано определение режимов работы космического аппарата в номинальном режиме и в случае отказов. На рис. 2.4 приведен пример многоуровневой диаграммы разных режимов эксплуатации космических аппаратов. Она включает в себя обозначение возможных режимов работы

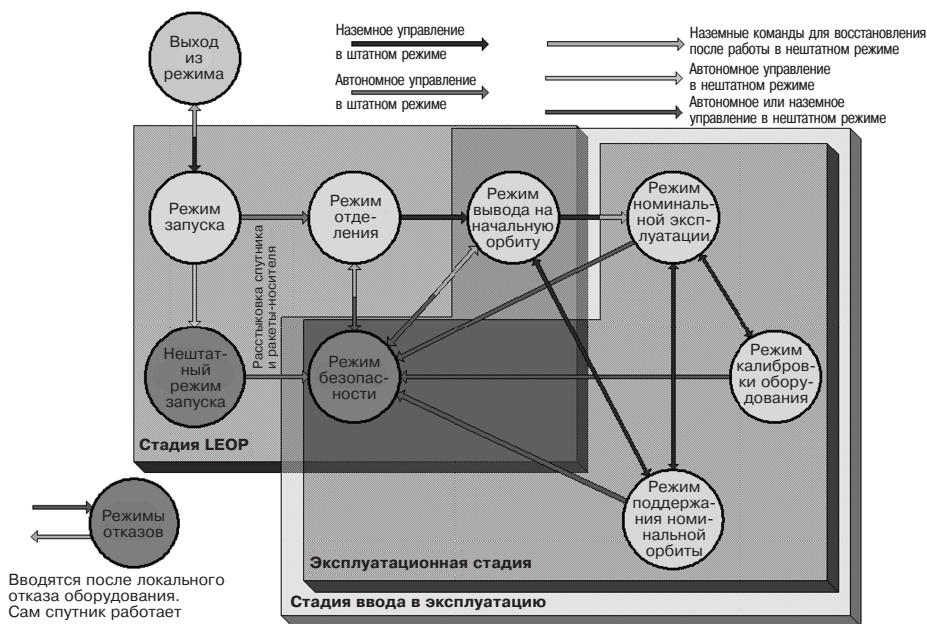


Рис. 2.4. Режимы работы спутника и переходы между ними. © Astrlum GmbH

космического аппарата и идентификацию соответствующих событий (триггеров), которые будут запускать переходы между режимами, а также перечень необходимых команд для осуществления перехода на нужный режим. На этом уровне, естественно, еще не определяется точный список таких телекоманд. Однако уже уместно идентифицировать основные режимы, поскольку позднее они станут объектом управления бортового программного обеспечения.

Следующим шагом уточнения проекта на фазе В является тщательная проработка полного дерева<sup>1</sup> космического аппарата со всеми основными физическими и функциональными элементами, в том числе бортового программного обеспечения как элемента дерева изделия и в конечном счете любого программного обеспечения для спутниковых приборов, которые будут разработаны, или программного обеспечения для контроллеров подсистем. На рис. 2.5 показан пример фрагмента такого дерева изделия на стадии разработки В.

1	SEDB Id	CI Code	Abr	Abr	Abr	Abr	Abr	Abr	Abr	Abr	Abr	Abr	Abr	Abr	Abr	Abr	Abr
68	S111AH3	B1AH3												ca3	Cable 3		
69	S111B	B1B															
70	S111B1	B1B1															
71	S111BH1	B1BH1															
72	S111BH2	B1BH2															
73	S112	B321												ca2	Cable 2		
74	S1121	B3211															
75	S1122	B3212															
76	S1123	B3213															
77	S1124																
78	S113	B322															
79	S1131	B3221															
80	S11311																
81	S11312																
82	S1132	B3222															
83	S1133	B3223															
84	S1134	B3224															
85	S1135	B3225															
86	S11351																
87	S11352																
88	S11353																
89	S11354																
90	S11355																
91	S11356																
92	S11357																
93	S11358																
94	S1136	B3226															
95	S11361																
96	S11362																
97	S1137	B3227															
98	S1138	B3228															
99	S1139	B3229															
100	S113A	B322A															
101	S113B	B322B															
102	S113C																

Рис. 2.5. Дерево изделия на стадии В. © Astnum GmbH

<sup>1</sup>Дерево изделия — блок-схема конструкции в виде иерархического дерева составных узлов и деталей. — Прим. пер.

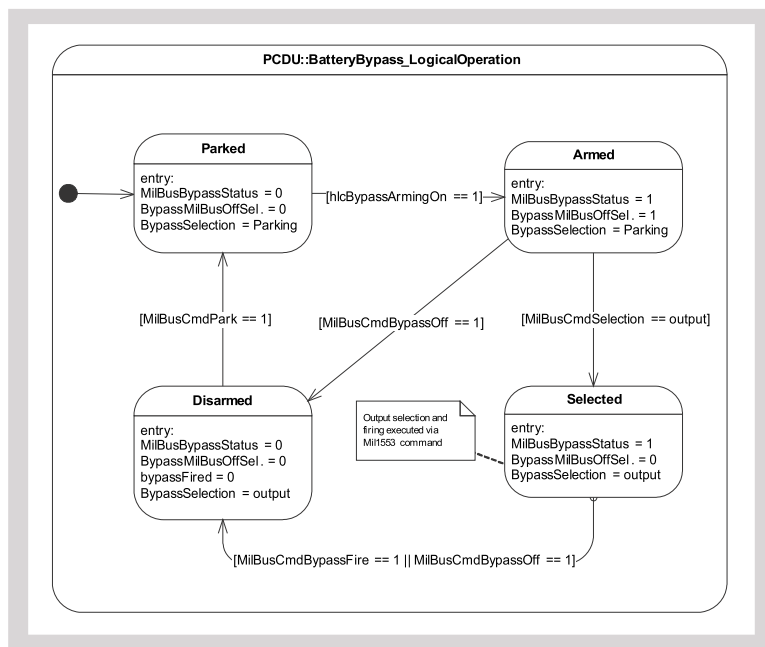


Рис. 2.6. Пример диаграммы режимов эксплуатации оборудования

После завершения формирования дерева космического аппарата следует идентификация деревьев отдельных типов оборудования, которое будет использоваться для выполнения полетного задания, например выбора следящего телескопа теленаведения X от поставщика Y. В идеальной ситуации этот выбор становится вполне очевиден в конце стадии В. При реальном проектировании, однако, может возникнуть ситуация, когда уже отобранное и одобренное оборудование не имеет нужного квалификационного уровня. В таких случаях следует рассмотреть несколько альтернативных решений. Если блоки специального оборудования можно выбрать с помощью документации поставщика, то автоматически можно получить информацию о его режимах работы оборудования, определить переходы между режимами, телекоманды и телеметрию.

Еще одним этапом стадии В является первое определение режимов работы оборудования при номинальных и нештатных режимах эксплуатации космического аппарата соответственно. На этом этапе определяется статус режимов работы разнообразного оборудования, которое подключается с помощью OBSW во время перехода космического аппарата с режима на режим, а также идентифицируются возможные конфигурации резервных блоков А/В.