

Разработка и производство специализированной ЭКБ для космических применений: текущее состояние и перспективы развития. Часть 1

Владимир СТЕШЕНКО,
к. т. н.
steshenko@steshenko.ru

В статье отражен опыт проектирования специализированных СБИС для аппаратуры ракетно-космической техники (РКТ), в том числе разработки СБИС типа СнК на основе встроенных процессорных ядер и интерфейсных СФ-блоков. Предлагаемые решения направлены на сокращение сроков и, соответственно, стоимости разработки специализированных СБИС, а также на повышение качества аппаратуры.

В последние два-три года вопросам обеспечения качества и надежности аппаратуры ракетно-космической техники уделяется колоссальное внимание. Это и совещания с участием первых лиц государства, и соответствующие решения федеральных агентств и ведомств. Появились и публикации в отраслевых изданиях [1, 2], посвященные этой проблематике. В статье изложено видение проблемы и предлагаются пути ее решения.

Прежде всего, попытаемся определить, что же такое космическая микроэлектроника и чем она отличается от общепромышленной.

Рассмотрим основные особенности электронной компонентной базы, применяемой в условиях космического пространства. К ним относятся:

- Широкая функциональная номенклатура: по данным ESCIES (координационный центр ЕКА по применению электронных компонентов для космических программ) — порядка 1500 наименований.
- Крайне малая серийность: от 10–15 (!) — до 100 000 шт. (на протяжении всего жизненного цикла изделия).
- Высокие требования к надежности (безотказность, ресурс, сохраняемость): $\lambda = 10^{-9}–10^{-10}$ — для активных элементов; $\lambda = 10^{-11}–10^{-12}$ — для пассивных элементов при малосерийном производстве ЭКБ.
- Стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства: не менее 50 крад (по данным www.escies.org).
- Расширенный температурный диапазон: от –60 до +125 °С.
- Необходимость обеспечения длительных сроков безотказной работы: 15 лет и более. Следует особенно отметить проблемы элементной базы для аппаратуры РКТ. Это, пре-

жде всего, разнообразие применяемых типов сложных изделий (широкая функциональная номенклатура) при крайне малой серийности, несвойственной для массовой электроники. Специфическими являются исключительно высокие требования к надежности и стойкости к дестабилизирующим факторам космического пространства (ДФ КП) для обеспечения длительных сроков функционирования.

Уже это краткое перечисление особенностей ЭКБ для РКТ говорит о том, что развитие космической микроэлектроники отлится от магистрального пути развития общепромышленной электроники, определяемой ITRS [3–5]. Это касается и крайне низких потребных объемов выпуска. Тенденция уменьшения проектных норм изготовления СБИС в общепромышленной и потребительской электронике в первую очередь связана со стремлением получить как можно больше кристаллов с одной пластины, поскольку стоимость пластины составляет \$ 800–1800, при этом с уменьшением размера кристалла в два раза выход увеличивается в четыре [1]. Количественные потребности в специализированной ЭКБ для космических применений идут в разрез с тенденциями развития общемировой электронной промышленности. Конечно, в последние годы потребность в изделиях микроэлектроники является ключевой проблемой для кремниевых производств, в том числе для новых отечественных компаний (ОАО «НИИМЭ и Микрон», ОАО «Ангстрем»). Впрочем, подобные трудности испытывают и ведущие зарубежные производители. В частности, в переговорах с одним из ведущих производителей СБИС по технологии «кремний на изоляторе»

(КНИ, SOI) стали известны минимальные объемы запуска, интересные производителю, — от 100 пластин 200 мм в квартал.

Соответственно, в стоимость специализированных СБИС основной вклад вносят затраты на подготовку производства и проведение испытаний. Так, в настоящее время средняя стоимость подготовки производства (изготовление фотошаблонов) и выпуск опытной партии в количестве 10–12 пластин (так называемый «инженерный лот») на фабриках Юго-Восточной Азии (X-fab Sarawak, Silterra и т. п.) составляет \$120 000 по технологии 0,18 мкм, \$350 000 при проектных нормах 0,13 мкм, а по технологии 0,09 мкм — около \$1 млн. Близкие цены на производство по проектным нормам 0,18 мкм были названы на совещании в ОАО «НИИМЭ и Микрон». Далее мы еще вернемся к вопросам применения субмикронных технологий в производстве СБИС для аппаратуры РКТ.

Что касается испытаний, то их стоимость определяется комплексами стандартов и дополнительных требованиями заказчика. Как уже отмечалось в [1], в существующих стандартах «... большинство методик испытаний ЭКБ на радиационную стойкость относятся к воздействию, присущим ядерному взрыву. Но космическое пространство обладает иной спецификой. Это относительно низкие по интенсивности электронное и протонное излучения от естественных радиационных поясов Земли, действующие на космический аппарат в течение длительного времени, а также тяжелые заряженные частицы космического пространства и высокоэнергетические протоны». В настоящее время принята достаточно полная международная классификация эффектов,

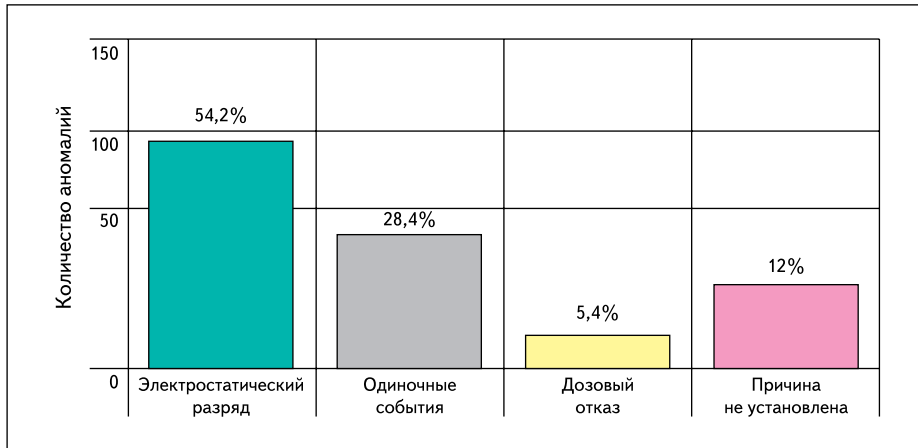


Рис. 1. Распределение количества аномалий в функционировании РЭА космических аппаратов в зависимости от причины аномалии

вызываемых ДФ КП, имеющими не только радиационный характер. Автор не ставит перед собой задачу подробно изложить механизмы воздействия на ЭКБ различных факторов и особенности проведения испытаний. Заинтересованный читатель может подробно ознакомиться с ними, например, в работах [6–11]. Для полноты картины приведем лишь небольшую статистику (рис. 1) по влиянию различных дестабилизирующих факторов на аппаратуру РКТ [6].

До сих пор отдельным «большим» вопросом является отсутствие положения об ЭКБ космической категории качества (аналог Space), учитывающего принципиальные особенности функционирования в условиях воздействия ДФ КП.

За рубежом вопросам разработки и поддержания актуальности нормативной документации уделяется большое внимание. В частности, существует обширная система стандартов и спецификаций Министерства обороны США, описывающая как требования, так и методики разработки и производства ЭКБ космической категории качества. Это в первую очередь следующие документы:

- MIL-STD-883. Test methods standard. Microcircuits.
- MIL-STD-750. Test method standard. Semiconductor devices.
- MIGSTD-15478. Electronic parts, materials, and processes for space and launch vehicles.
- DOD-E-8983. Electronic Equipment, Aerospace, Extended Space Environment, General Specification for.
- MIL-PRF-19500. Semiconductor Devices, General Specification for.
- MIL-PRF-38534. Hybrid Microcircuits, General Specification for.
- MIL-PRF-38535. Integrated Circuits (Microcircuits) Manufacturing, General Specification for.
- QML-38535. Qualified Manufacturers List.
- MIL-STD-1523. Age Controls of Age Sensitive Elastomeric Materials for Aerospace Applications.

- MIL-STD-1580. Destructive Physical Analysis for Space Quality Parts.
- MIL-STD-1540. Test Requirements for Launch & Space Vehicles.
- MIL-HDBK-217. Reliability Prediction of Electronic Equipment.
- MIL-HDBK-263. Electrostatic Discharge Control Handbook for Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies.
- MIL-HDBK-343. Design, Construction, and Test Requirements for One-of-a-Kind Spacecraft.

Большинство из них находится в свободном доступе в Интернете на соответствующих официальных сайтах учреждений Минобороны США и его контрагентов (например, <http://snebulos.mit.edu/projects/reference/>, <http://assist.daps.dla.mil/quicksearch/>, www.dscccols.com).

Разработкой соответствующей нормативной документации занимается и Европейское космическое агентство (ЕКА) — Координационный центр ЕКА по применению электронных компонентов для космических программ (www.escies.org). Есть соответствующие службы и в структуре NASA (www.nepp.nasa.gov).

Безусловно, обязательной является сертификация разработчика и производителя ЭКБ космического уровня качества в соответствии с ISO 9001:2008.

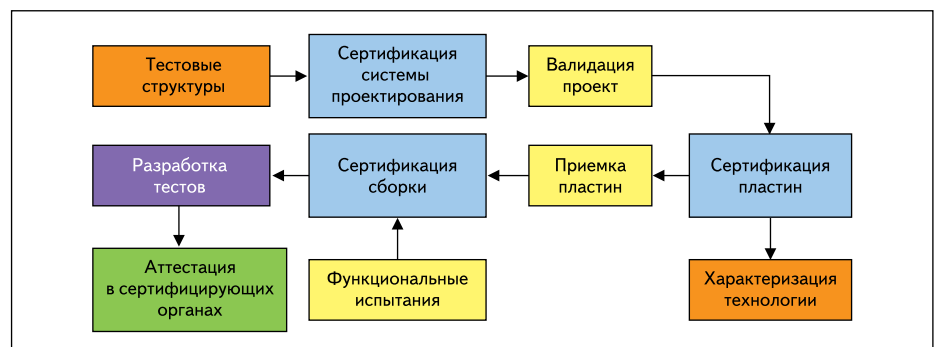


Рис. 2. Схема сертификации разработки и производства ЭКБ космического применения

На рис. 2 на примере компании Aeroflex Colorado Springs (www.aeroflex.com) показана схема сертификации разработчика и производителя ЭКБ космического уровня качества. Как можно заметить, контрольные процедуры и сертификация предусмотрены на всех этапах жизненного цикла изделия.

Также отметим, что ЭКБ космического применения, как правило, имеет длительный жизненный цикл: для относительно серийных компонентов служебной аппаратуры (контрольно-измерительные системы, системы управления электропитанием, телеметрия и т. п.) срок производства прибора может составлять 20 лет и более. Учитывая и длительные сроки разработки, определяемые огромным объемом испытаний аппаратуры, наземной отработкой, летными испытаниями, можно говорить о том, что ключевые компоненты должны находиться в производстве в течение большого периода времени, что противоречит современному состоянию микроэлектроники, где сменяемость типов микроконтроллеров и ПЛИС происходит каждые 2–3 года, а то и чаще. На рис. 3 представлены данные о длительности жизненного цикла наиболее популярных типов СБИС (по материалам конференции DSMS Conference 2002, New Orleans, Louisiana).

Налицо противоречие между требованиями к жизненному циклу аппаратуры и реальной сменяемостью поколений ЭКБ. Несмотря на наметившуюся тенденцию активного применения ЭКБ индустриального уровня качества в аппаратуре РКТ, основной останавливающий этот процесс фактор (помимо недостаточных гарантируемых изготовителем показателей сохраняемости, надежности и радиационной стойкости) — это большие затраты на ее сертификацию и дополнительные испытания, соизмеримые со стоимостью разработки и изготовления специализированной ЭКБ, а также крайне ограниченный во времени жизненный цикл ЭКБ индустриального уровня качества, приводящий к необходимости проводить весьма затратные работы либо по перевыпуску конструкторской и технологической документации и проведению дополнительных дорогостоящих испытаний аппаратуры, либо необходимость выпуска изделий-аналогов.

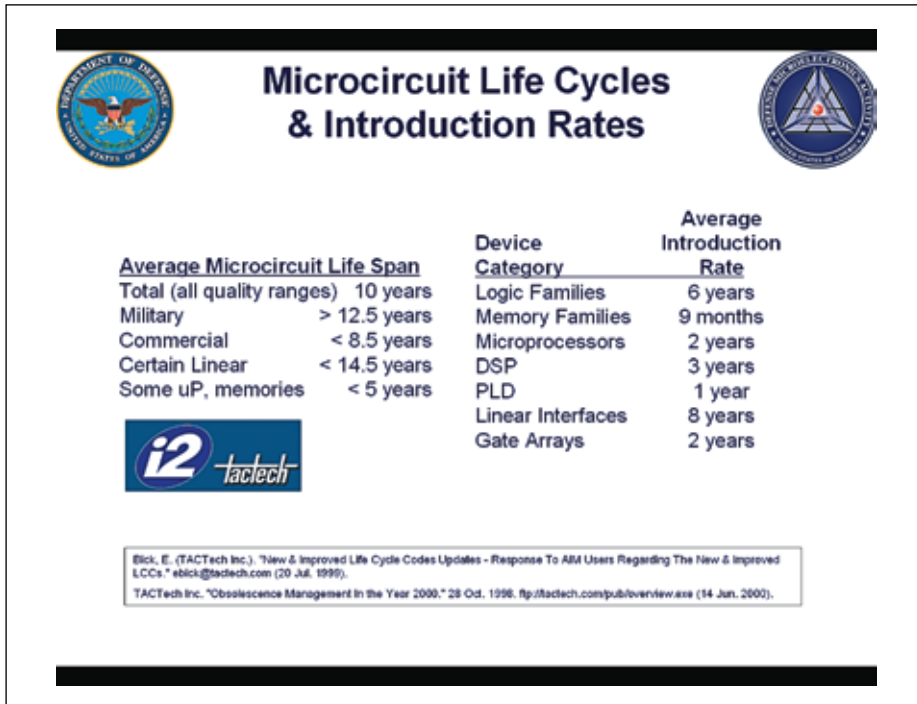


Рис. 3. Данные о длительности жизненного цикла наиболее популярных типов СБИС

кристаллов осуществляется на технологических линиях ведущих производителей.

Решение задачи обеспечения ЭКБ возможно только путем комплексного подхода, состоящего в разумном использовании отечественных и импортных комплектующих, создания специализированных отраслевых производств и интеграции их в мировой рынок специализированных компонентов, в том числе и как поставщиков специализированной ЭКБ.

Обозначив ключевые проблемы, стоящие перед разработчиками и производителями ЭКБ для аппаратуры космического применения, перейдем к рассмотрению путей их решения в существующих условиях.

Современные подходы к созданию специализированной ЭКБ, стойкой к дестабилизирующим факторам космического пространства, можно разделить на следующие большие группы — технологические методы повышения стойкости, конструктивные и схемотехнические, а также обеспечение поддержки моделирования влияния ДФ КП на этапе проектирования компонентов (рис. 4).

К технологическим методам следует отнести использование специализированных техпроцессов изготовления СБИС и специальных материалов. Так, в частности, это технологии «кремний на сапфире» (КНС), «кремний на изоляторе» (КНИ), специализированные операции легирования и т. п. Все эти способы чрезвычайно дорогостоящи, и поэтому они реализованы на небольшом числе производств. В частности, ведущими производителями подобных структур являются компании Honeywell и Peregrine Semiconductors (США) и ряд других.

К конструктивным способам повышения стойкости следует отнести использование специальных корпусов, методов локальной защиты и т. п.

К схемотехническим методам повышения радиационной стойкости, в том числе к тяжелым заряженным частицам (ТЗЧ), относится

Таким образом, ключевой при создании ЭКБ для применения в аппаратуре РКТ является задача обеспечения приемлемой стоимости малосерийного производства при безусловном обеспечении требований широкой номенклатуры, длительного жизненного цикла, надежности, стойкости к дестабилизирующим факторам и отказоустойчивости.

Решение этой задачи возможно, и положительный зарубежный опыт доказывает это. Выпуск высоконадежных компонентов в небольшом количестве нерентабелен для крупных предприятий электронной промышленности, однако представляет весьма доходный и динамично развивающийся бизнес как для специализированных нишевых компаний (в США — Aeroflex, во Франции

3D+ и др.), так и для специализированных подразделений крупных корпораций (BAE Systems (Великобритания), General Dynamics и Honeywell (США)). Мировым лидером в этой области является компания Aeroflex (имеющая партнеров в России, которые в состоянии обеспечить не только поставку компонентов, но и трансфер технологий), проводящая на своих мощностях сборочные и испытательные операции и поставку потребителям высоконадежных СБИС космического уровня качества. При этом в кооперации задействованы ведущие производители металлокерамических корпусов, кристаллов и специализированных материалов. Компания Aeroflex осуществляет разработку специализированной ЭКБ, серийный выпуск



Рис. 4. Подходы к созданию специализированной ЭКБ, стойкой к дестабилизирующим факторам космического пространства

применение библиотек элементов с мажоритированием на уровне вентилях, кодеров, декодеров Хэмминга, так называемых «усиленных» библиотек элементов, отбор отечественных компонентов и ряд других приемов. Основным достоинством такого подхода является возможность его реализации на существующих и перспективных фабриках, обладающих стандартной (предназначенной для массовой продукции) технологией. Такой подход получил международное название Rad hard by design [12, 13]. Так, французская компания MHS обеспечивает таким путем гарантированную стойкость порядка 100 крэд по объемному кремнию. Аналогичным путем работает Aeroflex, используя обычные технологические линейки ведущих производителей. При этом можно задействовать как уже существующие мощности зарубежных фабов, так и вводимые мощности ОАО «НИИМЭ и Микрон» и ОАО «Ангстрем». Такой подход дает повышение стойкости, сопоставимое с применением специальной технологии, но при существенно (в 5–7 раз) меньшей стоимости. В таблице 1 приведен ряд схемотехнических решений, позволяющих повысить отказоустойчивость типовых цифровых систем.

Таблица 1. Схемотехнические решения повышения отказоустойчивости компонентов цифровых систем

Наименование	Изображение	Комментарии
Транзистор		Транзисторные структуры с резервированием
Резистор		Логические библиотеки на резервируемых транзисторных структурах
КЭШ-память		Контроль четности для парирования сбоя
Память		Эффективные блочные коды (Рид-Соломон и др.)
Система		Схемотехнические решения резервирования

Рассмотрим ряд практических схемотехнических приемов по созданию надежных СФ-блоков и СВИС. Большинство схемотехнических методов можно разделить на две группы — методы контроля и коррекции ошибок и методы резервирования. К первой группе относятся методы избыточного кодирования, такие как контроль по четности или кодам Хэмминга, мажорирование и ряд других. Все они предполагают постоянную работу избыточной аппаратуры вместе с основной для обнаружения и, по возможности, исправ-

ления ошибок. Ко второй группе относятся методы, основанные на контроле работоспособности и автоматической замене неисправных блоков резервными.

При выборе алгоритма, обеспечивающего повышение отказоустойчивости, было решено остановиться на коде Рида-Соломона. Особенностью кода Рида-Соломона является то, что он обладает оптимальным кодовым расстоянием, то есть при заданной длине контрольной суммы этот код исправляет максимально возможное число ошибок. Использование кода Рида-Соломона также обеспечивает удобство работы с памятью. Так как доступ к элементам Flash-памяти организован постранично, целесообразно кодировать целиком страницу памяти, при этом контрольная сумма будет располагаться в конце страницы.

Рассмотрим синтез алгоритма помехоустойчивого кодирования/декодирования данных с внешнего носителя. Размер страницы памяти — 2К, поэтому кодирование осуществляется над полем Галуа GF(2¹¹). В этом случае длина символа $s = 11$ бит. Необходимо подобрать соответствующие параметры кода (n, k) , где n — длина закодированного слова (в символах), k — длина информационной части слова. Так как информация обрабатывается побайтно, необходимо, чтобы величины $n \times s$ и $k \times s$ были кратны 8 ($n \times s$ и $k \times s$ — длины закодированного слова и его информационной части в битах).

По условиям технического задания под контрольную сумму отводится до 25% памяти. Для данных условий были выбраны следующие параметры кода: 1488, 1120 (в байтовом эквиваленте — 2046, 1540).

Выбранный код позволяет исправлять $t = (n-k)/2 = (1488-1120)/2 = 184$ символьные ошибки.

Для решения задачи синтеза рассматриваемого алгоритма кодирования и декодирования Рида-Соломона необходимо сгенерировать элементы поля GF(2¹¹) и определить операции над ними.

Конечные поля GF(p^r) порядка p^r , где характеристика p — простое число, а размерность r — натуральное число, порождаются с помощью неприводимых полиномов степени r (в нашем случае $p = 2, r = 11$). Особенно удобно использовать примитивные неприводимые полиномы $\pi(x)$. В этом случае простое поле GF(p) может быть расширено до поля GF(p^r) за счет присоединения корня α полинома $\pi(x)$, то есть с помощью сравнений по двум модулям: p и $\pi(x)$. При выборе полинома $\pi(x)$ из различных вариантов предпочтение отдается полиномам с минимальным числом ненулевых коэффициентов, а при равенстве этого числа — полиномам, имеющим ненулевые коэффициенты при меньших степенях переменной x . Для нахождения неприводимого полинома $\pi(x)$ для поля Галуа GF(2 ^{r}) фактически требуется найти простое число из диапазона $[2^r+1; 2^{r+1}-1]$,

отвечающее критериям, приведенным выше. Для поля GF(2¹¹) это полином $x^{11}+x^2+1$.

Алгоритм последовательного образования элементов расширенного поля GF(2 ^{r}) состоит в следующем:

- 1) Корень α полинома $\pi(x)$ выбрать в качестве примитивного элемента поля, то есть принять $\pi(\alpha) = 0$, откуда следует $\alpha^r = f(\alpha)$.
- 2) Элементы поля $N \in \{0, 1, 2, \dots, r-1, r\}$ сопоставить со степенями α^{N-1} и двоичными комбинациями из r компонент.
- 3) Элементы поля $N \in \{r+1, r+2, \dots, 2^r-1\}$ получить друг за другом путем сдвига влево предыдущей комбинации для $N-1$. При этом, если в разряде справа (разряде переполнения) $(r+1)$ появится 0, то полученную в результате сдвига комбинацию оставить без изменения. Иначе, если в указанном разряде переполнения появится 1, то отбросить ее, а к полученной комбинации добавить поразрядно по модулю 2 константу c_r , соответствующую выбранному неприводимому полиному $\pi(x)$ (для введенного выше полинома $x^{11}+x^2+1$ $c_r = (211+22+1)_{10} = 100000000101_2$).

Операции сложения и вычитания в полях Галуа выполняются сложением по модулю 2, а умножения и деления — при помощи логарифмических таблиц. Для получения таблицы логарифмов для некоторого (предварительно сгенерированного) поля Галуа необходимо переупорядочить элементы данного поля по возрастанию, а в ячейки таблицы последовательно записать порядковые номера исходных элементов (до сортировки).

Код Рида-Соломона является циклическим кодом и, следовательно, может быть задан с помощью порождающей или проверочной матриц (как всякий линейный код) либо с помощью порождающего или проверочного полиномов. Для выбранного кода порождающий полином вычисляется по формуле:

$$g(z) = \prod_{i=0}^{l=m-m} (z + \alpha^i),$$

$$m = n-k = 2t = 368, \alpha = 2.$$

В разрабатываемом алгоритме кодирования РС-кода над полем Галуа GF(2¹¹) осуществляется во временной форме. Кодирование осуществляется с помощью порождающего полинома $g(z)$ и является систематическим, то есть в информационную часть кодового слова изменения не вносятся, а вычисляемая контрольная сумма располагается в конце кодового слова.

Кодирование производится путем вычисления остатка от деления полинома $Q(z)$ на порождающий полином $g(z)$, где $Q(z)$ — кодовое слово.

Схема РС-кодера представлена на рис. 5. Число ячеек m сдвигового регистра равно числу сомножителей порождающего полинома (368), разрядность регистров — 11 бит.

Алгоритм кодирования Рида-Соломона состоит из следующих шагов:

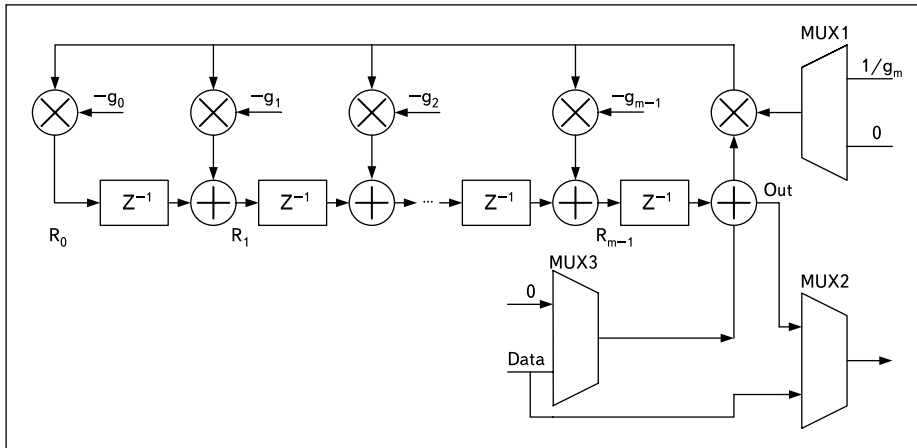


Рис. 5. Схема кодера Рида-Соломона

(временные диаграммы кодера и декодера представлены отдельно, так как данные на выходе кодера и декодера появляются спустя значительное время: на одной временной диаграмме невозможно отобразить нужный временной интервал).

На приведенных диаграммах видно, что данные на выходе декодера соответствуют данным на входе кодера, что подтверждает правильность работы разработанной RTL-модели.

Тестирование кодера/декодера производилось в программах TSIM2 и GRMON. На вход кодера подавалась псевдослучайная последовательность данных — 1120 11-разрядных чисел. На выходе кодера в нее по случайным позициям записывались 184 случайных ошибочных данных. Данные на выходе декодера и входе кодера сравнивались (из выходных данных декодера вычитались входные данные кодера). В случае правильной работы устройства вектор, содержащий разность выходных и входных данных, должен быть нулевым.

Окончание следует

Литература

1. Басаев А. С., Гришин В. Ю. Космическое приборостроение: главное — правильная концепция // Электроника: НТБ. 2009. № 8.
2. Хартов В. Космические проблемы электроники: перед употреблением — взболтать // Электроника: НТБ. 2007. № 7.
3. Стешенко В., Руткевич А., Гладкова Е., Шишкин Г., Воронков Д. Проектирование СБИС типа «система на кристалле». Маршрут проектирования. Синтез схемы // Электронные компоненты. 2009. № 1.
4. Стешенко В. Б., Руткевич А. В., Бумагин А. В., Гулин Ю. Ю., Воронков Д. И., Гречищев Д. Ю., Евстигнеева Е. В., Синельникова М. В. Опыт разработки СБИС типа SnK на основе встроенных микропроцессорных ядер // Компоненты и технологии. 2008. № 9.

- 1) Вначале все регистры содержат 0.
- 2) На вход кодера подаются данные (Data), начиная со старшего коэффициента. MUX0 → Data, MUX1 → $1/g_p$, MUX2 → Data. Всего подается $(n-m) = k = 1120$ 11-битных символов. При этом на выходе out последовательно выдается частное, начиная со старшего коэффициента.
- 3) MUX0 → 0, MUX1 → 1, MUX2 → Out. На вход подается m нулей, при этом из регистров поступает остаток от деления $Q(z)z^m/g(z)$, где $Q(z)$ — кодовое слово, $g(z)$ — порождающий полином.

Выходные данные представляют собой $n = 1488$ 11-битных символов, причем первые $k = 1120$ из них повторяют входное кодовое слово, а оставшиеся $m = 368$ являются контрольной суммой.

Рассмотрим синтез алгоритма декодирования. Формат входных данных декодера — последовательность $n = 1488$ 11-битных символов, из которых $k = 1120$ — информационные, а $m = 368$ являются контрольной суммой (формат входных данных декодера идентичен формату выходных данных кодера).

Выходные данные декодера — последовательность $k = 1120$ 11-битных символов.

Алгоритм декодирования РС-кода (1488, 1120) состоит из следующих этапов:

- 1) Вычисление синдрома S .
- 2) Вычисление вектора ошибок:
 - Определение местоположений ошибок l
 - Нахождение величин ошибок e .
- 3) Коррекция кодового вектора и извлечение сообщения.

Модель кодера Рида-Соломона состоит из стандартных блоков — умножителей, сумматоров и регистров, соединенных в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 5.

Модель РС-декодера построена из следующих СФ-блоков: блока синдромов, блока Тренча-Берлекампа-Мессе, блока Ченя-поиска, блока Форни и вычислителей значений полиномов.

На рис. 6, 7 представлены временные диаграммы работы РС-кодера и РС-декодера соответственно. Рис. 6а, 7а соответствуют моментам начала обработки данных, рис. 6б, 7б — моменту появления выходных данных

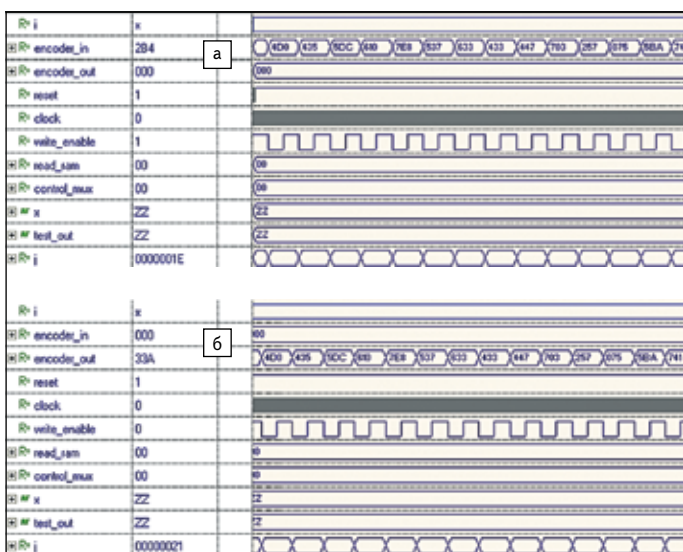


Рис. 6. Временные диаграммы работы РС-кодера

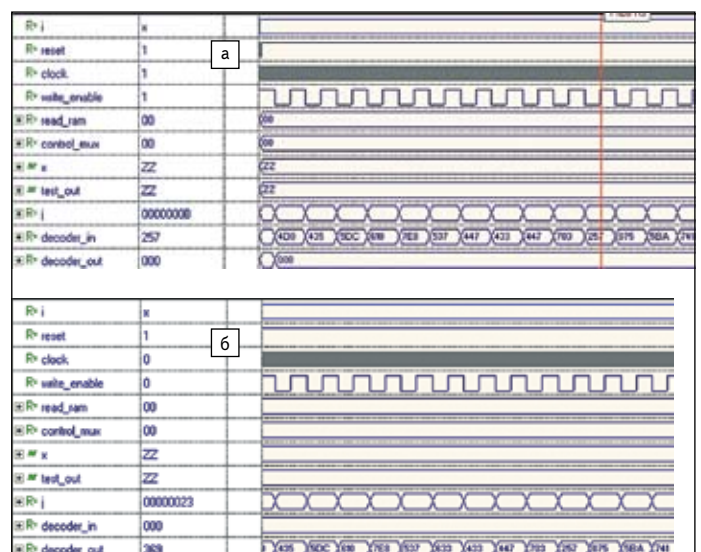


Рис. 7. Временные диаграммы работы РС-декодера

5. Бухтев А. А. Методы и средства проектирования систем на кристалле // Chip news. 2003. № 4.
6. Koons H. C., et al. The impact of the space environment on space systems // Aerospace Technical Report TR-99 (1670). 1999. No 1.
7. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004.
8. Осипенко П. Одиночные сбои — вызов для современных микропроцессоров // Электронные компоненты. 2009. № 7.
9. Никифоров А. Ю., Телец В. А., Чумаков А. И. Радиационные эффекты в КМОП интегральных схемах. М.: Радио и связь, 1994.
10. Ionizing radiation effects in MOS devices & circuits. Ed. by Ma T. P. and Dressendorfer P. V. John Wiley and Sons, 1989.
11. Zebrev G. I., Pavlov D. Y., Pershenkov V. S., Nikiforov A. Y., Sogoyan A. V. et al. Radiation response of bipolar transistors at various irradiation temperatures and electric biases: modeling and experiment // IEEE Trans, on Nuclear Science. 2006. V. 53, No 4.
12. Laco R. CMOS scaling, design principles and hardening-by-design methodologies. 2003 IEEE NSREC. Short Course. Radiation effects in advanced commercial technologies: How design scaling has affected the selection of space borne electronics. July 2003. Monterey, California.
13. Oldham T. R. How device scaling affects single event effects sensitivity. 2003 IEEE NSREC. Short Course. Radiation effects in advanced commercial technologies: how design scaling has affected the selection of space borne electronics, July 2003. Monterey, California.
14. Руткевич А., Стешенко В., Шишкин Г. Самосинхронная электроника: направления развития // Электроника: НТБ. 2009. № 8.
15. Рабаи Ж. М., Чандракасан А., Николич Б. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования. Пер. с англ. М.: ООО «ИД «Вильямс»», 2007.
16. Казеннов Г. Г., Кокин С. А., Макаров С. В., Перминов В. Н., Перминов Д. В. Системы схемотехнического моделирования AVOCAD. Проектирование аналого-цифровых систем на кристалле // Электроника: НТБ. 2004. № 5.
17. Перминов В. Н., Жуков А. В., Дубровин С. А., Макаров С. В. AVOCAD + САПР СБИС компаний Cadence и Synopsys. Интеграция на основе технологии многоязыковых трансляторов и объектных баз данных // Электроника: НТБ. 2005. № 4.
18. Кокин С. А., Перминов В. Н., Макаров С. А. Современные технологии схемотехнического моделирования. Система AVOSpice компании UniqueICs // Электроника: НТБ. 2007. № 5.
19. Paran P., Tu H. Robert., Minami R. Eric., Lum G., Ko K. Ping, Hu Ch. A Complete Radiation Reliability Software Simulator // IEEE Tran. On Nuclear Science, Vol. 41, No 6, Dec. 1994.
20. Телец В., Цыбин С., Быстрицкий А., Подъяпольский С. ПЛИС для космических применений. Архитектурные и схемотехнические особенности // Электроника: НТБ. 2005. № 6.