

# Динамика космических технологий: микросистемы в корпусе

Посвящается 50-летию полёта Ю.А. Гагарина

**Николай Данилин, Димитр Димитров, Ильяс Сабиров, Даниил Белов (Москва)**

**В статье рассматривается концепция создания функционально сложных микросистем с повышенным уровнем радиационной стойкости на базе использования гибридных интегрированных «систем в корпусе».**

## ВВЕДЕНИЕ

Сравнительный анализ динамики развития космической микроэлектроники в США, Японии, ЕС и Китае с одной стороны и России с другой показывает, что потенциал развития отечественной электронной промышленности в таких приоритетных направлениях, как космическое приборостроение, атомная энергетика и высокоточные интеллектуальные системы вооружения, ещё имеется.

Особенностью указанных областей является большая номенклатура микроэлектронных компонентов (более 4600 типов) при малых количествах по каждой позиции (от 10 до 1000 шт. в год). К этим компонентам предъявляются жёсткие требования по радиационной стойкости (от 100 Крад до 1 Мрад) и надёжности (до 20 лет безотказной работы). Опыт, накопленный отечественными разработчиками, позволяет создавать подобные компоненты и изделия на мировом уровне с учётом миниатюризации, многофункциональности и минимального энергопотребления.

Ведущие мировые фирмы, работающие в космической и оборонной отраслях, около 20 лет используют в своих изделиях так называемые «системы в корпусе» (СвК) (System in Package). Тем самым достигается миниатюризация изделия (вес, габариты), уве-

личивается его функциональность и снижается энергопотребление. При этом цикл разработка–выпуск сокращается до нескольких недель (программа *microsatellite in six days*). Сегодня в РФ существует реальная возможность разрабатывать и производить отечественные СвК.

В настоящей статье обсуждается концепция применения гибридных интегрированных систем в корпусе в качестве современной ЭКБ «макроуровня» для построения микроспутниковых систем на примере действующей в США практики, с анализом сопутствующих проблем и экономических аспектов.

В течение последних десяти лет на мировом космическом рынке установилась тенденция разработки и производства микроспутниковых систем массой от 1 до нескольких десятков килограммов. В зависимости от весовой характеристики космического аппарата, была введена условная классификация – микро-, нано- и пикоспутники. В настоящей статье используется термин «микроспутник» в качестве объекта применения систем в корпусе.

Микроспутники интересны для потенциальных потребителей из-за их существенно меньшей стоимости и сокращённого цикла реализации. Одновременно во многих областях

промышленности стали разрабатываться и применяться изделия микросистемотехники и субмикронных полупроводниковых технологий (МЭМС, системы на кристаллах и системы в корпусе). Это позволило реализовать множество космических миссий микроспутниковыми системами (в том числе и распределёнными спутниковыми архитектурами) за счёт традиционных решений, выработанных на основе классических спутниковых систем. На орбите появились целые микроспутниковые кластерные формации, вроде американской *Ionospheric Observation Nanosatellite Formation (ION-F)*.

Почти все космические миссии США (коммерческого или военного назначения) вплоть до конца 1990-х были реализованы NASA с использованием традиционных спутников. Проект конкретного спутника и его массогабаритные характеристики определяются целями и задачами миссии и находятся в строгой зависимости от текущего уровня технологий (электроника, конструкционные материалы, прикладное программное обеспечение и т.д.) и установленных бюджетных ограничений.

Важнейшее значение для проекта космического аппарата имеет технологическая зависимость. На рисунке 1 в обобщённом виде представлена «дорожная карта» весовых характеристик некоторых типовых спутников, запущенных NASA в период с 1958 по 2010 гг.

Таким образом, СвК является стратегической технологией для мировой и отечественной космической промышленности и полностью определяет возможности эффективного освоения рынка микроспутниковых систем.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПУТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ЭКБ

В настоящее время космическая технология так широко вошла в современную жизнь, что отказ от неё

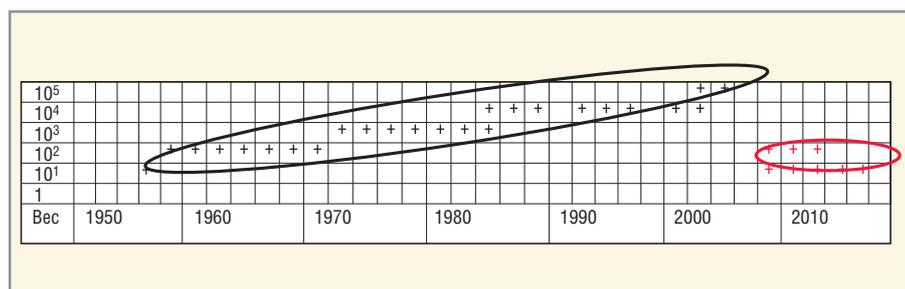


Рис. 1. Вес спутников, запущенных NASA в период 1958–2010 гг.

отбросил бы развитие цивилизации далеко назад. Невозможно представить, что прогноз погоды, разведка полезных ископаемых, мониторинг окружающей среды, развитие телекоммуникаций и телевидения, обеспечение обороноспособности и многие другие задачи решались бы без средств космического базирования. Если первые космические аппараты (КА) функционировали в течение года, то в настоящее время стоит задача обеспечения сроков активного функционирования КА в течение 10–12 лет, а в перспективе – 15 лет и более.

Космос – экстремальная окружающая среда, где сделанные человеком системы редко получают второй шанс. Поэтому исключительное внимание требуется уделить качеству электронной компонентной базы (ЭКБ), предназначенной для систем длительных сроков активного существования (ДСАС).

Ввиду высоких требований САС (15–20 лет) в практике ведущих западных космических фирм при комплектации бортовой аппаратуры применяется ЭКБ в основном космического уровня Space. В крайнем случае применяется ЭКБ, специально разработанная и изготовленная под требования стандартов уровня Space или дополнительно отбракованная процедурами upscreening уровня MIL. При этом комплектующим присваивается статус «нестандартных».

Элементная база уровня Space позволяет реализовать большую избыточность по качеству (10–20 раз) и создать резерв противодействия внешним факторам космического пространства, в том числе радиационную стойкость

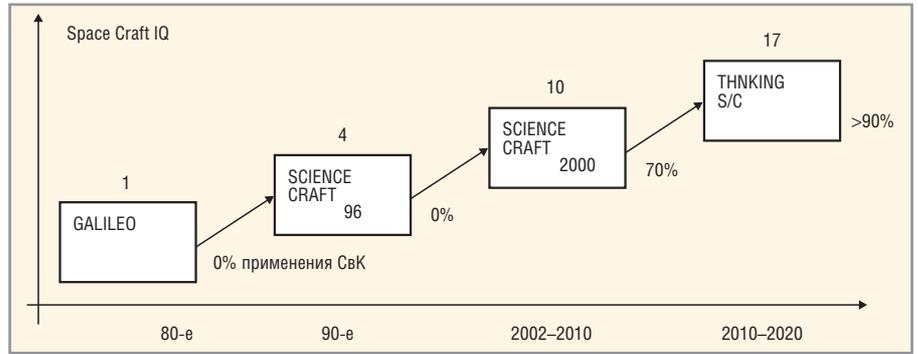


Рис. 2. Концепции миниатюризации и функциональной сложности микроспутниковых систем

100 Крад и более, парировать влияние статического электричества при сборке. Другими словами, наивысшее качество и надёжность компонентов всегда приводят к снижению общей стоимости проекта (отсутствие рекламаций, отказов, сбоев).

Как считают специалисты NASA, создание космического качества недостижимо только средствами испытаний. Основное – это производство ЭКБ, а отбраковка должна быть вспомогательным средством. Примером служат достижения ведущих фирм США, в первую очередь Aeroflex, в реализации принципиально новых технологий, в том числе СвК.

**КОНЦЕПЦИИ ПОСТРОЕНИЯ МИКРОСПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ С ПОЗИЦИИ МИНИАТЮРИЗАЦИИ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ**

Информация о миниатюризации, модульности и функциональной сложности микроспутниковых систем на мировом рынке в период 1980–2010 гг. и прогноз до 2020 г. схематично представлены на рисунке 2 четырьмя базисными концепциями.

Первая концепция связана со спутником Galileo (1989), предназначен-

ной для изучения Юпитера и его спутников. Проблемы, возникшие во время его эксплуатации (например, сбой и поломки антенного комплекса, трудности переконфигурирования управляющих подсистем и др.) выявили неэффективность бортовых компьютерных систем и технологий обработки информации на борту.

Вторая концепция, Science Craft 96, связана с модульностью полезной нагрузки и её программного обеспечения, что позволило гибко реализовать технические решения для разного класса миссий в рамках одной платформы. В качестве примера можно привести 10-летнюю миссию к Плутону.

Третья концепция, Science Craft 2000, также построена на модульных гибридных узлах и на обновляемом программном обеспечении. В ней решения на базе систем в корпусе и программируемой логике занимают около 90% от всех технических решений.

Четвёртая концепция, Thinking Space Craft, за счёт применения архитектурных модулей высокой функциональности (многокристалльных (до 18) 3D-систем в корпусе и самоконфигурируемого программного обеспечения (built in intelllect)) позволит строить высо-

**Снижение условной стоимости проекта микроспутниковой системы в результате применения СвК и в зависимости от веса спутника**

Подход к реализации проекта микроспутниковой системы	Вес 50...100 кг	Вес 10...50 кг	Вес 1...10 кг
Условная стоимость проекта без применения СвК	100	100	100
Условная стоимость проекта с долей СвК до 50%	70	60	50
Условная стоимость проекта с долей СвК до 75%	55	40	30
Условная стоимость проекта с долей СвК более 85%	45	30	25

коэффициентные микроспутниковые системы и самоорганизующиеся сети на их основе.

**СИСТЕМЫ В КОРПУСЕ – НОВЫЙ ПОДХОД К ЭКБ ДЛЯ МИКРОСПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ**

Системы в корпусе (СвК) участвуют в реализации почти всех модулей и подсистем выпускаемых сегодня в США, Японии и Китае микроспутников (см. рис. 2) и по сути – являются ЭКБ макроразмера:

- обеспечивают интеграцию цифровых, аналоговых и СВЧ-подсистем с МЭМС-модулями и тонко-/толстоплёночными структурами в общем корпусе, с получением максимальной функциональности в единице объёма;
- применение ряда типизированных СвК различного назначения как в платформе, так и в полезной нагрузке значительно снижает массогабаритные характеристики микроспутников. Компания Northrop Grumman (США) использует в своих микроспутниках 26 типов СвК, а Boeing Aerospace – 19 типов;
- технические решения на базе СвК эффективнее с точки зрения тестопригодности, гибкости и перестраиваемости;
- микроспутники на основе СвК испытываются с меньшими затратами (в собранном виде) на стендах типа payload tester;
- значительно снижаются расходы на разработку, испытания и производство спутниковых систем в целом.

Типичная СвК спутникового применения содержит до восьми полупроводниковых кристаллов (по технологиям КМОП, КНИ, КНС) в 2D- или 3D-конструктивном исполнении, более 50 дискретных активных и пассивных компонентов на керамической подложке, как правило, выполненных по технологии LTCC. Для таких СвК характерно применение герметичных металлокерамических или металлических корпусов.

Типовые технологии сборки для производства СвК включают монтаж «перевернутого кристалла», монтаж корпусов с габаритами кристаллов, монтаж 2D- и 3D-многокристалльных узлов, монтаж микросистем на базе полупроводниковых кристаллов, МЭМС, ВЧ- и оптоэлектронных узлов.

Типичная 3D-сборка из двух кристаллов имеет высоту 0,7 мм и включает верхний кристалл (толщина 110 мкм), слой клея (38 мкм), разделитель, второй слой клея (38 мкм) и нижний кристалл (110 мкм) со слоем клея. Разварка выводов реализована алюминиевой или золотой проволокой.

В программах ведущих зарубежных космических фирм на период 2010–2015 гг. предусмотрено применение СвК, содержащих до 14 полупроводниковых кристаллов. Типизированные гибридные сборки СвК уже рассматриваются в составе ЭКБ в системах логистики ведущих зарубежных компаний.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

«Система в корпусе» является стратегической технологией для мировой и отечественной космической промышленности и полностью определяет возможности эффективного освоения рынка микроспутниковых систем (см. в таблицу).

Анализ возможностей внедрения СвК в отечественной промышленности и их применения в космических аппаратах на период 2010–2015 гг. приводит к следующим выводам:

- номенклатура радиационно-стойких микросхем отечественного производства (в т.ч. на базе технологий КМОП, КНИ, КНС) весьма ограничена и, в основном, находится на этапе ОКР. К настоящему моменту номенклатура типичных электронных изделий для космической промышленности включает более 4600 наименований;
- технология СвК требует применения кристаллов для реализации 2D- и 3D-гибридныхборок, что предполагает наличие рынка заведомо аттесто-

ванных кристаллов (Known Good Die). Этого рынка у нас практически нет. Таким образом, возникает необходимость в применении зарубежных полупроводниковых кристаллов (пластин);

- отсутствует нормативная база (ОСТ, Временное положение, Решение и т.д.) по применению полупроводниковых кристаллов (пластин) зарубежного производства. При существующих нормативных документах и небольших расходах её можно ускоренно разработать и внедрить;
- отечественная практика проектирования, производства и тестирования изделий СвК не развита;
- условия для сборки и тестирования СвК и аппаратура на их базе реально существуют на нескольких отечественных предприятиях;
- достаточно хорошо развита отечественная логистика по обеспечению космической отрасли радиационно-стойкими микросхемами и кристаллами (пластинами) в формате Known Good Die.

На основании изложенного следует, что технологию СвК необходимо срочно внедрять в производство космической аппаратуры. От заинтересованных ведомств и предприятий требуются определённые усилия и финансовые вложения для достижения конкурентоспособности в стратегической космической области.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Данилин Н.С., Димитров Д.М., Сабиров И.Х. Разработка систем в корпусе (Known Good Die). Доклад на научно-технической конференции «Электронная компонентная база космических систем». Адлер. Сентябрь 2009.
2. Димитров Д.М., Сабиров И.Х. Опыт США по эффективному созданию высоконадёжной аппаратуры с военным и авиакосмическим назначением на базе систем в корпусе. Доклад на научно-технической конференции «Электронная компонентная база космических систем». Адлер. Сентябрь 2009.
3. Данилин Н.С., Димитров Д.М., Сабиров И.Х. Системы в корпусе – магистральный путь развития ЭКБ для авиации и космоса. Вестник электроники. 2009. № 2.
4. Урличич Ю.М., Данилин Н.С., Димитров Д.М., Сабиров И.Х. Электронная компонентная база систем в корпусе при разработке и реализации космической бортовой аппаратуре. Интеграл. 2011. № 1. ©