

Б.И. Седунов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ НА НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ

Современные сложные электронные системы в основном комплектуются ранее освоенными в производстве компонентами. Большое число электронных компонентов, входящих в сложную систему, предъявляет повышенные требования к их надежности и заставляет проектировщиков использовать при разработке системы только хорошо известные и успевшие подтвердить свою надежность компоненты. Однако для достижения уникально высоких характеристик приходится неизбежно рисковать и применять в сложных системах новейшие компоненты, в том числе и работающие на новых физических принципах.

В статье проанализирован опыт проектирования сверхсложной системы «Сплав» оперативного наблюдения поверхности Земли из космоса. В базовом элементе системы «Сплав» – фоточувствительной матрице приборов с зарядовой связью (ПЗС) – использован неизвестный ранее физический принцип синхронного накопления энергии движущегося изображения. Отсутствие прототипа проектируемой системы повлекло за собой большую теоретическую и экспериментальную работу по обоснованию ее работоспособности и по оценке ее будущих характеристик.

Базовый элемент определил структуру всей проектируемой системы. Проектирование и экспериментальная отработка новой системы проходили параллельно с разработкой и совершенствованием технологии изготовления новых электронных изделий в соответствии с принципом сопряженного проектирования сложной системы в целом и ее базовых компонентов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космическое наблюдение, фоточувствительная матрица, прибор с зарядовой связью, цифровая телекоммуникационная система, космическая связь, спутник-ретранслятор, антенная фазированная решетка.

B.I. Sedunov

THE NEW PHYSICAL PRINCIPLES BASED COMPLEX SYSTEM PROJECTION

Modern complex electronic systems mostly comprise wide production industrial components. A large number of electronic components entering the complex system requires their high reliability and forces designers to base their projects only on well known components, which have happened to prove their high reliability. But to reach the extremely high system performance it may be unavoidable to risk in utilizing the newest components, including those, which work on new physical principles.

The paper analyzes the super complex system Splav projection experience, the system being designed for the Earth surface operative observation from Space. The system's basic element - the photosensitive charge coupled device (CCD) matrix, utilizes a unknown before physical principle of the moving image energy synchronous accumulation. The lack of the prototype for the system under projection required a large theoretical and experimental work to prove its functionality and evaluate its future characteristics.

© Седунов Б.И., 2018.

The basic element has defined the structure of the whole system under projection. The new system projection and the experimental work out went in parallel with the new electronic components technology development and perfection in agreement with the joint projection principle for the whole system and its basic components.

Keywords: *remote sensing, Space observation, photosensitive matrix, charge coupled device, digital telecommunication system, Space communication, relay satellite, phased array antenna.*

Введение

Полет первого космонавта Юрия Алексеевича Гагарина в космос не только открыл эру пилотируемых космических полетов, но и проложил дорогу для создания сложнейших беспилотных автоматических космических систем: дистанционного зондирования, телекоммуникационных, навигационных, научно-исследовательских. Под руководством генерального конструктора Сергея Павловича Королева к 1961 г. были решены сложнейшие научно-технические проблемы обеспечения безопасного полета космонавтов. Разработаны наземные комплексы траекторных измерений и навигации, обработки телеметрической информации и управления полетом космического аппарата, бортовые системы электропитания, терморегулирования, ориентации космического аппарата, автономного управления полетом. Созданные комплексы и системы обеспечили богатый задел для разработки и создания беспилотных автоматических систем дистанционного зондирования поверхности Земли из космоса. На базе этого задела в нашей стране в кратчайшие сроки были созданы и запущены беспилотные автоматические комплексы космического фотографирования, космической связи, метеорологические спутники, научные спутники исследования магнитного и гравитационного полей Земли, исследования Луны и других планет Солнечной системы.

Первые космические фотоаппараты серии «Зенит» создавались на базе пилотируемых космических аппаратов. Вот что говорит о таком аппарате Википедия: «Космический аппарат разработан в ОКБ-1 С.П. Королева (ныне РКК «Энергия») на базе конструкции пилотируемого космического корабля «Восток». Он состоит из сферической возвращаемой капсулы 2,3 м в диаметре и массой около 2 400 кг. Внутри сферической капсулы устанавливалась вся специальная аппаратура (фотографическая, фототелевизионная, радиоразведывательная)» [1].

Однако размещение фотоаппаратуры в небольшом космическом аппарате «Восток» препятствовало существенному увеличению разрешающей способности фотоснимков КА «Зенит» из-за ограничений на размеры фокусного расстояния и диаметра объектива. Для дальнейшего развития космического фотографирования в г. Куйбышев (ныне Самара) под руководством генерального конструктора Дмитрия Ильича Козлова был создан филиал РКК «Энергия», центральное специализированное конструкторское бюро (ЦСКБ) с заводом «Прогресс» [2]. Конструкторское бюро ЦСКБ постоянно разрабатывало и внедряло на завод «Прогресс» новые модификации космических аппаратов (КА) серии «Зенит», а завод обеспечивал их серийный выпуск. Согласно Википедии: «За 33-летний период было запущено более пяти сотен «Зенитов», что делает его самым многочисленным типом спутников подобного класса в истории космических полетов» [1].

Вскоре в ЦСКБ была начата разработка собственной серии космических аппаратов «Янтарь» [3] с увеличенным фокусным расстоянием объектива, что позволило существенно повысить разрешающую способность фотоснимков. Вся аппаратура беспилотного космического аппарата компоновалась вокруг целевого фотоаппарата, а управление бортовой аппаратурой осуществлялось бортовой цифровой вычислительной машиной БЦВМ «Салют-3» [4], разработанной в НИИ микроприборов (НИИ МП)

Минэлектронпрома. История вовлечения НИИ МП в разработку БЦВМ «Салют-3» отражена в статье Г.В. Носкина [5]. Успешная разработка БЦВМ «Салют-3» и внедрение ее в серийное производство повысили авторитет НИИ микроприборов в ЦСКБ и в космической отрасли в целом.

Разработчики и заказчики космических фотографических комплексов ясно видели существенную проблему космического фотографирования – большое время доставки отснятой фотопленки на Землю. Даже сброс экспонированной фотопленки через возвращаемые капсулы приводил к задержке в получении готового снимка в несколько дней, что не устраивало заказчиков.

Для повышения оперативности систем космического наблюдения в рамках космической программы «Алмаз» [6] велась разработка телевизионной аппаратуры видеонаблюдения на базе электронно-лучевых видеоконвекторов с передачей аналоговой информации по радиолинии при пролете над наземным пунктом приема, обработки и регистрации фотоснимков. Но какой ценой!

В статье «Проект боевой космической станции “Алмаз”» [7] сказано: «Проект станции предполагал, что “Алмаз” станет гораздо более совершенным космическим разведчиком, чем беспилотные автоматические аппараты-фоторазведчики серии “Зенит”. Более мощный фотоаппарат на “Алмазе” расходовал пленку на наземные объекты только по воле самих космонавтов. В их распоряжении был мощнейший “космический бинокль”, который позволял разглядывать Землю и в инфракрасном спектре. Если экипаж замечал что-то подозрительное, он мог запустить серию снимков. Фотопленка проявлялась тут же на борту станции, достойные внимания военной разведки снимки передавались на Землю либо по телевизионному каналу, либо в специальной спускаемой капсуле».

Некоторые просчеты проектирования станции «Алмаз» связаны с недостаточно высоким уровнем телекоммуникационных технологий в нашей стране и в мире к моменту начала разработки этой программы. Так, использование видеоконвекторов вносило геометрические искажения в изображения, аналоговый способ передачи информации ухудшал качество изображений, а передача информации при пролете станции над наземным пунктом существенно снижала средний объем информации, сбрасываемой на одном витке, что требовало привлечения космонавтов для отбора наиболее важных изображений, подлежащих сбросу на Землю.

Включение космонавтов в процесс фотографирования и передачи фотоснимков на Землю явилось серьезной проблемой при проектировании станции «Алмаз». Вместо обеспечения оптимальных условий для работы фотоаппарата много внимания пришлось уделить налаживанию нормальных условий для длительного пребывания космонавтов на станции. Пилотируемый тип станции существенно увеличил ее размеры и сложность и тем самым снизил надежность. Та же статья [7] свидетельствует: «3 апреля 1973 г. орбитальную станцию “Алмаз”, которую назвали “Салютом-2”, вывели на орбиту. На протяжении двух недель она успешно находилась в космосе, но в ночь на 15 апреля произошла разгерметизация отсеков, а вскоре перестали поступать телеметрические данные. <...> Существуют предположения, что разгерметизация произошла в результате столкновения станции с обломками космического мусора».

В связи с необходимостью усовершенствовать аппаратуру станции в октябре 1973 г. делегация от генерального конструктора станции «Алмаз» академика Владимира Николаевича Челомея прибыла в НИИ микроприборов для обсуждения возможных путей модернизации аппаратуры станции. В процессе дискуссии автором данной статьи было выдвинуто предложение заменить видеоконвекторы и фотопленку на борту станции на фоточувствительные матрицы приборов с зарядовой связью (ПЗС), которые должны были работать в режиме синхронного накопления энергии движущегося изображения. Тем самым была сформулирована инновационная идея

базового фоточувствительного элемента, революционизирующего технологию оперативного космического наблюдения.

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) – это принципиально новые изделия электронной техники, основанные на новом физическом эффекте переноса зарядов между близко расположенными конденсаторами со структурой металл-окисел-полупроводник (МОП) [8]. Этот эффект столь совершенен, что позволяет переносить зарядовые пакеты тысячи раз без заметной потери числа носителей (электронов или дырок) в пакете. На этом эффекте основано создание фоточувствительных матриц, насчитывающих десятки миллионов чувствительных элементов (пикселей) в своей структуре.

Большая скорость полета КА, порядка 8 км/с, в зависимости от высоты, вызывает движение изображения в фокальной плоскости космического фотоаппарата. При высоте полета 300 км и фокусном расстоянии 3 м коэффициент трансформации скорости составляет 10^5 , что дает скорость бега изображения 8 см/с. При типичной для пленочного фотоаппарата выдержке в одну сотую долю секунды изображение на неподвижной пленке будет смазано на 0,8 мм. Чтобы избежать такого огромного смаза, пленку протягивают со скоростью, равной скорости бега изображения в фокальной плоскости. Для реализации оперативного наблюдения вместо движущейся пленки было предложено перемещать зарядовые пакеты в неподвижной матрице ПЗС [9; 10] (рис. 1).

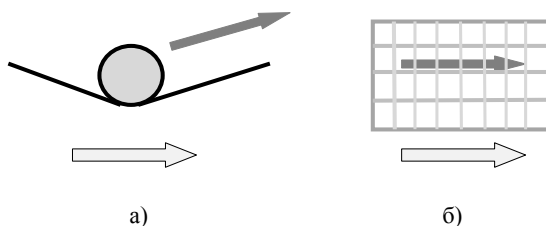


Рис. 1. Идея замены фотопленки, движущейся со скоростью движения изображения в фокальной плоскости, на неподвижную матрицу ПЗС, вдоль столбцов которой бегут зарядовые пакеты со скоростью, равной скорости бега изображения:

- лентопротяжный механизм шелевого фотоаппарата, обеспечивающий протяжку фотопленки со скоростью (узкая стрелка), равной скорости бега изображения (широкая стрелка);
- фрагмент неподвижной матрицы ПЗС, вдоль столбцов которой организован перенос зарядовых пакетов со скоростью (узкая стрелка), равной скорости бега изображения (широкая стрелка)

1. От идеи базового элемента к структуре системы оперативного космического наблюдения

Для доставки информации на Землю было предложено использовать спутники-ретрансляторы на геостационарной орбите. Это позволяло избавиться от ограничений времени передачи информации временем взаимной видимости космического аппарата и наземного пункта, которое не превышало 1% от суммарного времени полета КА. Но эти идеи выходили далеко за рамки давно установившейся концепции станции «Алмаз».

Директор НИИ микроприборов, Герой Социалистического Труда, Геннадий Яковлевич Гуськов в апреле 1974 г. принял решение сориентировать предложенный способ оперативного космического наблюдения не на посещаемую космонавтами станцию «Алмаз», а на беспилотный космический аппарат серии «Янтарь-2К» разработки ЦСКБ, для которого НИИ МП разработал БЦВМ «Салют-3».

Генеральный конструктор ЦСКБ Дмитрий Ильич Козлов с энтузиазмом встретил наше предложение и создал рабочую группу по разработке технических требований

к проектируемой системе. Совместная работа специалистов по микроэлектронной аппаратуре и по космическому фотографированию в режиме мозгового штурма способствовала взаимному обучению и генерации инновационных идей.

Проектируемая система получила название «Сплав». Для разработчиков это был сплав интеллекта и усилий разносторонних специалистов, а для директора НИИ МП Г.Я. Гуськова это был сплав разнородных секторов, отделов и лабораторий НИИ микроприборов и цехов опытных заводов «Компонент» и «Солнечногорский механический завод» для решения сверхсложной комплексной задачи. Базовая подсистема системы «Сплав» – подсистема приема изображений (ППИ), включавшая в себя многокристальный приемник движущихся изображений (ПДИ), – определила структуру всей системы: от нее зависели структура, объемы и скорости параллельных потоков цифровой информации. Она в свою очередь зависела от выбора конструкции и параметров базового элемента системы – фоточувствительной матрицы ПЗС, работающей в режиме синхронного накопления энергии движущегося изображения.

Даже без более глубокого теоретического и экспериментального обоснования замысел системы «Сплав» демонстрировал много ясно видимых достоинств.

- Система «Сплав» обещала сокращение времени получения на Земле готового изображения до часа вместо нескольких дней.

- Замена протяжки фотопленки синхронно с движением изображения в фокальной плоскости космического щелевого фотоаппарата на синхронное продвижение зарядов в матрице ПЗС обещала повысить точность синхронизации скоростей и уменьшение массы аппаратуры. Как сказал один из ведущих специалистов ЦСКБ В.Н. Косач: «Электроном легче управлять, чем космическим аппаратом».

- Наличие на борту КА «Янтарь-2К» БЦВМ «Салют-3» уже решало часть задачи создания системы «Сплав», обеспечивая точную информацию о скорости бега изображения в фокальной плоскости.

- Уже при первом обсуждении в ЦСКБ идеи системы был сформулирован принцип многозональной компенсации бега изображения в многокристальной конструкции приемника движущихся изображений [9] (рис. 2), что позволяло существенно снизить смаз изображения при отклонении оси визирования от вертикали. Вычисление скоростей бега изображения в центрах зон и синтез соответствующих тактовых импульсов для продвижения зарядов в матрицах ПЗС не были большой проблемой.

- Дискретная структура фоточувствительных матриц ПЗС обеспечивала высокую точность привязки изображений к местности, что облегчало решение топографических задач.

- Замена сброса информации при пролете над наземным пунктом на передачу информации через спутники-ретрансляторы на порядки увеличивала время, доступное для передачи, и тем самым исключала необходимость отбора космонавтом наиболее важных фрагментов изображения.

- Электронная обработка сигналов изображений позволяла скомпенсировать дымку, существенно ослаблявшую контраст фотографических изображений.

- Цифровое кодирование сигналов изображений устраняло влияние подсистем накопления и передачи информации через спутник-ретранслятор на Землю на сквозные характеристики системы [11].

- Многокристальная конструкция наземного фоторегистратора на базе линейек светодиодов, согласованная с многокристальной структурой ПДИ [9], обеспечивала высокий коэффициент передачи контраста при регистрации изображений.

- Цифровая обработка сигналов изображений в наземном комплексе позволяла менять масштаб снимка (цифровой зум) и получать высококачественные снимки наиболее важных объектов, тем самым устраняя влияние фоторегистратора на качество регистрации фотоснимков.

Многозональная компенсация смаза сигналов изображения в ПДИ при наклоне оси визирования от вертикали выгодно отличает этот приемник на матрицах ПЗС от фотопленки, которая движется как единое целое (рис. 2).

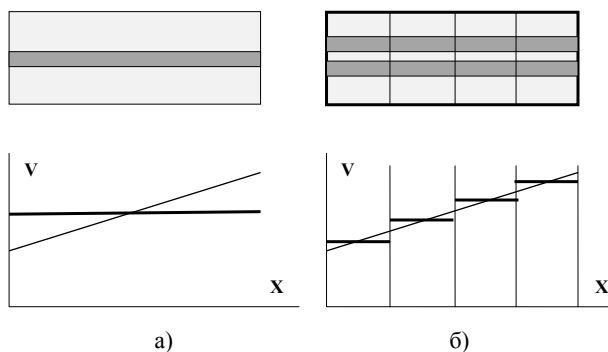


Рис. 2. Уменьшение величины смаза сигналов изображения в ПДИ с ростом числа зон компенсации смаза:

- а) вверху – фрагмент фотопленки, освещаемой через узкую щель (узкий темный прямоугольник); внизу – графики зависимости скорости бега изображения (тонкая прямая) и скорости протяжки пленки (толстая прямая) от координаты X ;
- б) вверху – ПДИ с билинейным расположением матриц ПЗС (узкие темные прямоугольники), разбитый на четыре зоны компенсации смаза; внизу – графики зависимости скорости бега изображения (тонкая прямая) и скоростей переноса зарядовых пакетов в отдельных зонах (толстые прямые) от координаты X

Матрицы ПЗС расположены в ПДИ в две линии, чтобы обрамление фоточувствительных областей не нарушало непрерывности снимка [9].

Рисунок показывает, что рассогласование скоростей падает с ростом числа зон компенсации. Смаз изображения – это произведение разности скоростей на время экспозиции. В щелевом фотоаппарате время экспозиции задается регулируемой шириной щели, а в ПДИ определяется числом фоточувствительных элементов (пикселей) в столбце матрицы ПЗС.

Учитывая государственную важность срочного создания системы оперативного космического наблюдения, было принято решение в кратчайшие сроки выпустить краткую версию Технического предложения. Для этого перечисленные достоинства предложенной системы оперативного космического наблюдения оказались достаточно убедительными. Техническое предложение обсудили на межведомственном совещании в НИИ микроприборов и представили на подпись руководителям трех министерств – Минэлектронпрома, Минобщемаша и Миноборонпрома – Александру Ивановичу Шокину, Сергею Александровичу Афанасьеву и Сергею Алексеевичу Звереву. Оно было использовано при подготовке Постановления ЦК КПСС и СМ СССР.

2. Разработка детального Технического предложения

Совет главных конструкторов в ЦСКБ принял решение создать на базе ранее разработанного КА «Янтарь-2К» [4] специальный космический аппарат «Янтарь-4КС1». Вот что говорит об этом Википедия [12]: «“Янтарь-4КС1” (индекс ГУКОС – 11Ф694, код проекта “Терилен”) – серия советских спутников видовой разведки, на которых впервые (из советских космических аппаратов) была установлена оптико-электронная цифровая фотокамера, что позволило принимать изображение с космического аппарата (КА) практически сразу после съемки. До этого снимки на советских спутниках видовой разведки производились на широкоформатную пленку,

которая доставлялась на Землю в спускаемых аппаратах (СА) через несколько дней или недель с момента съемки. Разработан в «ЦСКБ-Прогресс» (г. Самара). КА этой серии эксплуатировались с 1982 по 1989 г., и постепенно были заменены более совершенными спутниками «Янтарь-4КС1М» «Неман»».

Детальная редакция Технического предложения включала теоретические расчеты и экспериментальное подтверждение достаточной для целей космического наблюдения чувствительности и разрешающей способности матриц ПЗС, работающих в режиме приема движущихся изображений.

Принципиальная новизна базового элемента системы «Сплав» – матрицы ПЗС, работающей в режиме синхронного накопления энергии изображения, – заставила решить на этом этапе ряд задач, существенных для выбора структуры и характеристик проектируемой системы:

- оценка уровня облученности матриц ПЗС при различных условиях съемки;
- оценка зависимости чувствительности матрицы ПЗС от ее конструкции;
- оценка зависимости выходного сигнала матрицы ПЗС от уровня освещенности снимаемой местности, от скорости бега изображения в фокальной плоскости и от числа шагов накопления зарядов;
- оценка коэффициента передачи контраста изображения для различных конструкций матрицы и в различных условиях съемки;
- оценка влияния спектра изображения на входе матрицы ПЗС на ее чувствительность и коэффициент передачи контраста;
- оценка влияния дискретности матрицы ПЗС на ее передаточные характеристики; дискретность структуры матрицы ПЗС влияет на коэффициент передачи контраста и вносит шумы дискретизации изображения при высоких пространственных частотах [13].

3. Сопряженная разработка сложной системы и ее базовых элементов, работающих на новых физических принципах

К моменту начала разработки Технического предложения в стране не было освоенных в производстве приборов с зарядовой связью, поэтому вначале пришлось опираться на теоретические оценки характеристик приемника движущихся изображений, работающего на новых физических принципах. Но одновременно с производством этих оценок был начат поиск предприятий Минэлектронпрома, способных разработать и обеспечить производство матриц ПЗС с требуемыми характеристиками. Наиболее сильное в области полупроводниковой технологии предприятие Минэлектронпрома, НИИ «Пульсар», сначала отказалось взяться за эту работу, сославшись на большую занятость разработкой кремниевых мишеней для видеоконв системы «Алмаз».

Вскоре НИИ физических проблем (НИИ ФП) Минэлектронпрома объявил о создании первых в стране фоточувствительных линеек ПЗС. Хотя для системы требовались матрицы, а не линейки ПЗС, мы заключили с НИИ ФП договор о поставке линеек для оценки их чувствительности в различных спектральных диапазонах и для моделирования режима синхронного накопления движущегося изображения. Для этого нами был изготовлен имитатор бега местности, формировавший тестовое изображение, бегущее вдоль линейки с заданной скоростью. Генератор тактовых импульсов переменной частоты позволял осуществить продвижение зарядов вдоль линейки с заданной скоростью. При совпадении скоростей движения зарядов и изображения наблюдался максимум контраста сигналов изображения на выходе линейки ПЗС [9]. Тем самым была подтверждена работоспособность основной идеи системы «Сплав».

Узнав о результатах наших исследований линеек ПЗС, НИИ «Пульсар» решил взяться за разработку матриц ПЗС по нашему техническому заданию (ТЗ). При разработке ТЗ на матрицы ПЗС мы столкнулись с проблемой несоответствия требова-

ниям заказчика размеров фоточувствительных элементов (пикселей) матриц, которые НИИ «Пульсар» был готов разработать и изготовить при имевшемся уровне технологии. Чтобы обеспечить начало летных испытаний системы «Сплав» в кратчайшие сроки, мы приняли решение вписать в ТЗ те размеры элементов ПЗС, которые соответствовали имевшейся у НИИ «Пульсар» технологии. Но одновременно с этим, чтобы удовлетворить перспективные требования заказчика, мы выдали в НИИ «Пульсар» еще два задания на проведение перспективных разработок матриц ПЗС с уменьшенными размерами элементов.

Министр электронной промышленности Александр Иванович Шокин уделял большое внимание ходу разработки системы «Сплав» и обеспечению ее новейшими изделиями электронной техники. Когда другие министры говорили о недостатках электронных компонентов, он отвечал: «Поучитесь у Гуськова, как надо использовать новейшие изделия электронной техники».

Он одобрял наш принцип сопряженной разработки сложных систем и новейших комплекующих изделий [14] (рис. 3), рекомендовавший проектировщикам сложных систем закладывать в проектируемые системы новейшие компоненты и активно участвовать в работах по доведению этих компонентов до требуемых кондиций.

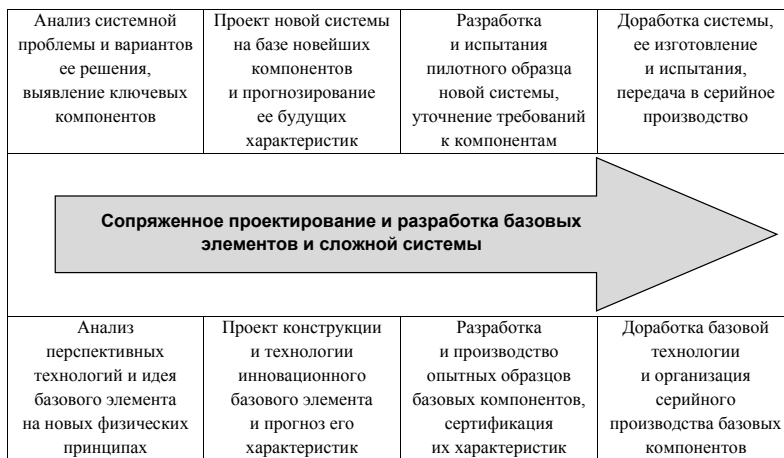


Рис. 3. Схема сопряжения процессов проектирования и разработки сложной микросистемной системы и ее инновационных базовых компонентов

Разработка принципиально новой космической системы вызвала большой интерес у студентов-дипломников и молодых специалистов, выпускников лучших вузов страны: МФТИ, МИЭТ, МГУ, Горьковского университета, МЭИ. Быстро разрастался молодежный коллектив разработчиков, выдвигавший и проверявший новые идеи и технические решения. В него вливались и опытные специалисты, решившиеся освоить новое направление в электронном аппаратостроении.

Для экспериментального подтверждения работоспособности идеи оперативного космического наблюдения и оценки характеристик приемника движущихся изображений нашим коллективом был создан испытательный стенд, включавший:

- имитатор бега местности с высокой стабильностью скорости движения тестовых изображений;
- высококачественный объектив, в качестве которого был использован уже побывавший в Космосе объектив с космического аппарата «Зенит»;
- оптическая скамья для прецизионной регулировки положения испытываемых матриц ПЗС и приемника движущихся изображений;

- устройство формирования тактовых импульсов для матриц ПЗС, усиления и аналого-цифрового преобразования выходных сигналов матриц ПЗС;
- буферное запоминающее устройство для запоминания отдельных кадров цифровой информации;
- устройство визуализации полученных изображений.

Перед испытаниями все матрицы ПЗС проходили входной контроль на специальном стенде, содержащем источник регулируемой равномерной засветки. При входном контроле определялись уровни темновых токов и неравномерности чувствительности матриц. На первом этапе освоения производства матриц ПЗС опытным заводом НИИ «Пульсар» эти показатели были далеки от требуемых для нормальной работы проектируемой системы «Сплав». Но мы видели, как с каждым месяцем снижались неоднородности получаемых с завода матриц ПЗС, и это укрепляло нашу уверенность в достижении требуемых характеристик матриц к началу комплектования штатных образцов ПДИ.

Действительность подтвердила правильность нашей стратегии: летные испытания системы «Сплав» были начаты в 1982 г., и первый космический аппарат «Янтарь-4КС1» продемонстрировал отличные характеристики передачи изображений. Поэтому уже следующий космический аппарат данной серии был укомплектован матрицами с меньшим размером пикселей [12], которые к этому времени были освоены опытным заводом НИИ «Пульсар».

Как только появилась твердая уверенность в достижимости заявленных характеристик системы «Сплав», стало возможным вовлечь НПО прикладной механики Минобщемаша в разработку спутника-ретранслятора. И в этой работе удалось применить уникальные электронные изделия – активные фазированные антенные решетки (АФАР) разработки НИИ МП на базе высокоэффективных мощных передающих транзисторов и малощумящих приемных транзисторов. Для НПО ПМ это был новый опыт, до этого они создавали космические ретрансляторы на базе вакуумных электронных приборов. Как сказано в Википедии [12], принципиально новой проблемой стало создание широкополосной линии передачи информации на Землю, так как для этого нужно было создать два канала связи: «Янтарь-4КС1» – СР «Гейзер» и СР «Гейзер» – Земля. Для линии «Янтарь-4КС1» – СР «Гейзер» пришлось использовать сложные антенны на базе активной фазированной антенной решетки (АФАР) для обеспечения быстрого взаимного наведения антенн спутников [4].

Заключение

Опыт проектирования и создания системы «Сплав» позволяет сформулировать важные для разработки сложных систем на новых физических принципах рекомендации.

- Учитывая большой срок разработки сложной системы, в конечный ее вариант нужно закладывать еще не существующие электронные изделия, работающие на новых физических принципах, характеристики которых могут быть спрогнозированы к моменту ввода системы в эксплуатацию на основании закона Мура совершенствования характеристик электронных изделий [15].

- Учитывая неизбежность поэтапного совершенствования характеристик электронных изделий, работающих на новых физических принципах, необходимо начинать экспериментальную отработку пилотного образца сложной системы с таких изделий электронной техники, которые могут быть изготовлены в ближайшее время.

- При разработке сложной инновационной системы важно тщательно отработать взаимодействие всех подсистем, для чего базовый элемент, функционирующий на новых физических принципах, должен быть работоспособным, но полное соответствие его рабочих характеристик всем заявленным в задании требованиям не обязательно.

• Широкое внедрение методов и средств цифровой обработки, накопления и передачи данных открывает дорогу к безграничному увеличению сложности электронных систем.

Литература

1. Зенит (космический аппарат) [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Зенит_\(космический_аппарат\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Зенит_(космический_аппарат)).

2. ЦСКБ Прогресс, официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.yandex.ru/search/?lr=216&clid=21979&text=цскб%20прогресс%20официальный%20сайт>.

3. Янтарь (космический аппарат) [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Янтарь_\(космические_аппараты\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Янтарь_(космические_аппараты)).

4. Кирилин А.Н., Анишаков Г.П., Ахметов Р.Н., Сторож Д.А. Космическое аппаратостроение: Научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ ЦСКБ-Прогресс. 2-е изд., доп. Самара: АО «РКЦ Прогресс», 2017. 376 с.

5. Носкин Г.В. БЦВМ «Салют-3» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://biography.wikireading.ru/235598>

6. Алмаз (космическая программа) [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Алмаз_\(космическая_программа\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Алмаз_(космическая_программа)).

7. Проект боевой космической станции «Алмаз» (СССР. 1964–1991 год) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://raigar.livejournal.com/411756.html>

8. Смит Дж.Е. История изобретения приборов с зарядовой связью // УФН. 2010. Т. 180. С. 1357–1362.

9. Седунов Б.И. Принципы, заложенные в основу первой отечественной цифровой системы дистанционного зондирования Земли из Космоса и цифровых формирователей сигналов изображений для космических телескопов // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн: конспекты лекций / V Всероссийские Армандовские чтения: молод. школа. Муром: МИ ВлГУ, 2015. С. 77. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mivlgu.ru/conf/armand2015/lecture-2015/pdf/titul.pdf>.

10. Гуськов Г.Я., Седунов Б.И., Петручук И.И., Возьмилов П.Н. Фотоприемник движущегося изображения // Патент SU 587637.

11. Седунов Б.И. Цифровая революция в наблюдении поверхности Земли из Космоса // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн: конспекты лекций / VII Всероссийские Армандовские чтения: молод. школа. Муром: МИ ВлГУ, 2017. С. 155. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mivlgu.ru/conf/armand2017/lecture-2017/pdf/titul.pdf>.

12. Янтарь-4КС1 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1876608>

13. Седунов Б.И. Моделирование алиасинга в ПЗС-формирователе сигналов изображения // Вестник Российского нового университета. 2017. Вып. 3. С. 17–23.

14. Гуськов Г.Я., Седунов Б.И. Конструирование сложной микроэлектронной аппаратуры // Электронная промышленность. 1977. Вып. 6 (60). С. 28–36.

15. Закон Мура [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Закон_Мура.

References

1. Zenit (kosmicheskiy apparat) [Elektronnyy resurs]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Zenit_\(kosmicheskiy_apparat\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Zenit_(kosmicheskiy_apparat)).

2. TSSKB Progress, ofitsial'nyy sayt [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.yandex.ru/search/?lr=216&clid=21979&text=tsskb%20progress%20ofitsial'nyy%20sayt>.

3. Yantar' (kosmicheskiy apparat) [Elektronnyy resurs]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Yantar'_\(kosmicheskie_apparaty\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Yantar'_(kosmicheskie_apparaty)).
4. Kirilin A.N., Anshakov G.P., Akhmetov R.N., Storozh D.A. Kosmicheskoe apparatostroenie: Nauchno-tekhnicheskie issledovaniya i prakticheskie razrabotki GNPRKTS TSSKB-Progress. 2-e izd., dop. Samara: AO "RKTS Progress", 2017. 376 s.
5. Noskin G.V. BTSVM "Salyut-3" [Elektronnyy resurs]. URL: <https://biography.wikireading.ru/235598>
6. Almaz (kosmicheskaya programma) [Elektronnyy resurs]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Almaz_\(kosmicheskaya_programma\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Almaz_(kosmicheskaya_programma)).
7. Proekt boevoy kosmicheskoy stantsii "Almaz" (SSSR. 1964–1991 god) [Elektronnyy resurs]. URL: <https://raigap.livejournal.com/411756.html>
8. Smit Dzh.E. Istoriya izobreteniya priborov s zaryadovoy svyaz'yu // UFN. 2010. T. 180. S. 1357–1362.
9. Sedunov B.I. Printsipy, zalozhennyye v osnovu pervoy otechestvennoy tsifrovoy sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz Kosmosa i tsifrovyykh formirovateley signalov izobrazheniy dlya kosmicheskikh teleskopov // Problemy distantsionnogo zondirovaniya, rasprostraneniya i difraktsii radiovoln. Konspekty lektsiy // V Vserossiyskie Armandovskie chteniya: molod. shkola. Murom: MI VIGU, 2015. S. 77. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://www.mivlgu.ru/conf/armand2015/lecture-2015/pdf/titul.pdf>.
10. Gus'kov G.Ya., Sedunov B.I., Petruchuk I.I., Voz'milov P.N. Fotopriemnik dvizhushchegosya izobrazheniya // Patent SU 587637.
11. Sedunov B.I. Tsifrovaya revolyutsiya v nablyudenii poverkhnosti Zemli iz Kosmosa. V sb. Problemy distantsionnogo zondirovaniya, rasprostraneniya i difraktsii radiovoln. Konspekty lektsiy // VII Vserossiyskie Armandovskie chteniya: molod. shkola. Murom: MI VIGU, 2017. S. 155. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://www.mivlgu.ru/conf/armand2017/lecture-2017/pdf/titul.pdf>.
12. Yantar'-4KS1 [Elektronnyy resurs]. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1876608>
13. Sedunov B.I. Modelirovanie aliasinga v PZS-formirovatele signalov izobrazheniya // Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. 2017. Vyp. 3. S. 17–23.
14. Gus'kov G.Ya., Sedunov B.I. Konstruirovaniye slozhnoy mikroelektronnoy apparatury // Elektronnyaya promyshlennost'. 1977. Vyp. 6 (60). S. 28–36.
15. Zakon Mura [Elektronnyy resurs]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Zakon_Mura.