

Принципы, заложенные в основу первой отечественной цифровой системы дистанционного зондирования Земли из Космоса и цифровых формирователей сигналов изображений для космических телескопов

Б.И. Седунов

*Российский Новый Университет
105005, Москва, ул. Радио, 22,. E-mail: Sedunov.b@gmail.com*

Развитие технологии дистанционного зондирования поверхности Земли из Космоса потребовало повысить оперативность доставки информации на Землю. Автор в 1973 году предложил заменить фотоплёнку в космическом фотоаппарате на многокристальный формирователь сигналов изображения на приборах с зарядовой связью (ПЗС) с последующей передачей цифровой информации через спутник-ретранслятор на геостационарной орбите. Создание цифровой системы дистанционного зондирования Земли из Космоса сопровождалось разработкой и экспериментальной отработкой принципиально новых технических решений, знание которых поможет совершенствовать технологию космического фотографирования.

The development of the Earth surface space observation technology put a task to shorten the information delivery time. In 1973 the author suggested to substitute the photosensitive film used in space photographic apparatus by a multichip imaging sensor on charge coupled devices (CCD) with a digital information retranslation to Earth via the geosynchronous satellite. The digital space observation system creation required the development and experimental testing of brand new technical decisions, to know which may be useful for further perfection of the space observation technologies.

1. Создание основ технологии фотографирования Земли из Космоса

12 апреля 1961 года успешно завершилась программа работ, возглавляемых генеральным конструктором Королёвым Сергеем Павловичем, по созданию базовой технологии пилотируемых космических полётов. Полёт первого космонавта Гагарина Юрия Алексеевича вокруг Земли на КА «Восток» доказал возможность полёта человека в Космос и наличие в СССР необходимой для этого научно-технической базы.

В процессе выполнения этой программы был решён ряд сложнейших задач, обеспечивших в дальнейшем быстрое развитие космической техники:

- Создание трёхступенчатой ракеты «Восток», способной выводить на круговую орбиту космические аппараты с массой более 4 тонн;
- Создание космического аппарата «Восток», обеспечивающего температурный режим и условия для жизнеобеспечения космонавта на орбите и безопасный возврат его на землю;
- Создание мощных наземных средств выведения ракеты в космос, средств измерения и контроля траектории ракеты и космического аппарата, средств дистанционного управления полётом.

Весь этот комплекс средств был немедленно использован для целей космического фотографирования. Место космонавта в космическом аппарате Восток заняли фотоаппараты, разработанные предприятиями Минобороны СССР, а средства жизнеобеспечения космонавта были преобразованы в средства обеспечения нормальных условий для фотографирования и доставки отснятой фотоплёнки на землю. Новый КА получил название «Зенит», Рис. 1 [1].



Рис. 1. Космический аппарат Зенит, созданный на базе пилотируемого КА Восток для целей космического фотографирования (Фото с сайта: [Зенит \(космический аппарат\)](#) — Википедия[1]).

Для дальнейшего развития направления космического фотографирования Генеральным конструктором Королёвым С.П. был создан в Самаре (в то время г. Куйбышев) филиал НПО Энергия, переименованный впоследствии в Центральное Специализированное Конструкторское Бюро (ЦСКБ-Прогресс) [2], которое возглавил Козлов Дмитрий Ильич [3].

Первые космические фотоаппараты с отснятой фотоплёнкой спускали с орбиты в составе спускаемого космического аппарата, но впоследствии была разработана технология доставки на Землю отснятой фотоплёнки в составе спускаемых капсул. Это позволило увеличить срок полезной работы космического аппарата и объём отснятого материала.

Набрав огромный опыт совершенствования и использования аппаратов серии Зенит, ЦСКБ-Прогресс разработало серию космических аппаратов Янтарь [4], в которых вся конструкция была сконструирована вокруг огромного космического фотоаппарата. Многие аппараты этой серии использовали фотоплёнку и спускаемые капсулы, но большой срок её доставки не устраивал заказчиков.

В начале 70-х годов прошлого века космическое фотографирование развивалось с большим размахом. Регулярно выходили в Космос спутники серии «Янтарь» со спускаемыми капсулами. Космическое фотографирование тогда ориентировалось на оптимизированные под свойства фотопленки линзовые объективы, разрабатываемые в Государственном Оптическом Институте и Производимые на Красногорском Механическом заводе. Но у заказчиков оставалась неудовлетворенность из-за большого времени доставки отснятой фотопленки и продолжительных, а иногда и безнадежных поисков на земле спускаемых капсул.

Секретарь ЦК КПСС Дмитрий Федорович Устинов, отвечавший за оборонные отрасли, оказал ключевое воздействие на отрасль, настаивая на обязательном и скорейшем переходе на оперативную доставку информации со спутников-

наблюдателей вместо многодневного процесса заполнения спускаемой капсулы на борту и последующих поисков её на земле.

Большую роль в развитии технологий космического фотографирования сыграло плодотворное сотрудничество ЦСКБ с НИИ микроприборов Минэлектронпрома СССР, преобразованным в 1975 году в НПО ЭЛАС и возглавляемым генеральным директором Гуськовым Геннадием Яковлевичем [5].

В начале 70-х годов микроэлектронная аппаратура, разрабатываемая в НИИ микроприборов, заняла прочное место в Космосе. Молодому предприятию удалось закрепиться в этом сегменте благодаря малым габаритам, высокой надежности аппаратуры и широкому использованию цифровой обработки и передачи информации.

Аппаратура космического назначения создавалась в НПО ЭЛАС на базе новейших электронных компонентов, выпускаемых предприятиями Минэлектронпрома. В Космосе находились бортовые цифровые вычислительные машины (БЦВМ), разработанные под руководством Филатова В.Н., управляющие полетом и функционированием космических аппаратов. Были в Космосе и цифровые телеметрические комплексы, разработанные под руководством Тверского Е.М., а также радиоаппаратура, разработанная под руководством Николаенко С.Н. для сигнализации о местоположении капсул с фотопленкой после их приземления. Особое значение для обеспечения высокого разрешения снимков из Космоса имело включение бортовой цифровой вычислительной машины в контур управления щелевым космическим фотоаппаратом.

2. Щелевой фотоаппарат

Для съёмки с орбиты, где скорость космического аппарата составляет около 8 км/с, необходимо компенсировать бег изображения в фокальной плоскости фотоаппарата для устранения смаза изображения. В плёночных фотоаппаратах это достигается путём протягивания фотоплёнки в фокальной плоскости со скоростью, совпадающей со скоростью бега изображения. Для регулировки времени экспозиции при этом используют щелевой затвор. Отношение ширины щели к скорости бега изображения определяет требуемое время экспонирования.

Щелевой космический фотоаппарат, Рис. 2, - это сложное устройство, включающее в свой состав бортовую цифровую вычислительную машину (БЦВМ) для вычисления скорости бега изображения в фокальной плоскости с учётом наклонной дальности до объекта съёмки. Вычислительная машина определяет и ширину щели для обеспечения требуемой величины времени экспозиции.

Тем самым, щелевой фотоаппарат реализует принцип синхронного накопления в фоточувствительном материале энергии движущегося изображения.

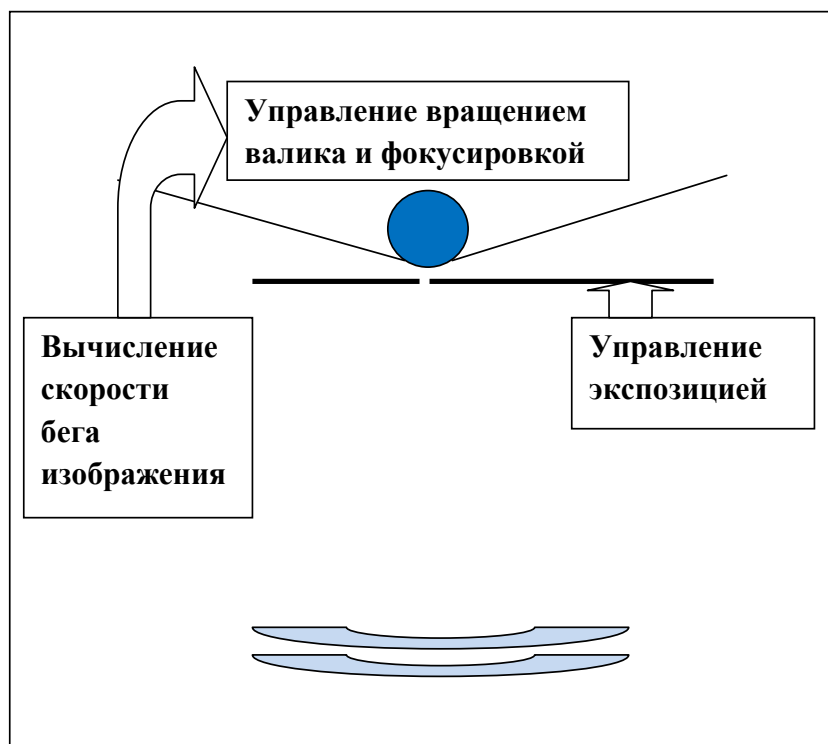


Рис. 2. Схема щелевого фотоаппарата для космического фотографирования. Скорость протяжки плёнки обеспечивается управляемым вращением валика по командам от БЦВМ, а управление временем экспозиции достигается регулировкой ширины щели с учётом времени суток, освещённости подстилающей поверхности, наклонной дальности, скорости бега изображения.

Недостаток щелевого фотоаппарата – разброс скоростей бега изображения по длине щели при наклонной съёмке, приводящий к смазу изображения на краях фотоплёнки. С этим недостатком удалось частично справиться, заменив фотоплёнку на твердотельные фоточувствительные матрицы приборов с зарядовой связью (ПЗС).

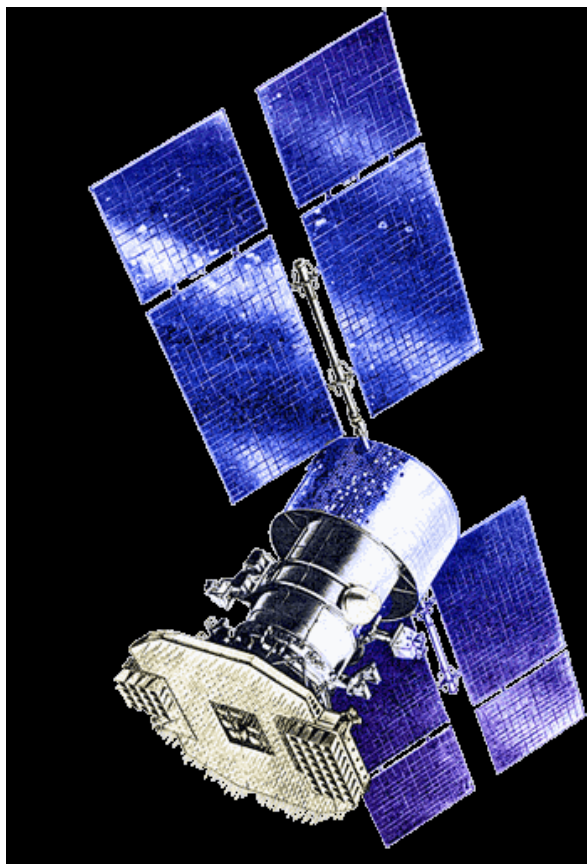
3. От фотоплёнки – к оптико-электронному фотографированию

В 1973 году автор данной лекции предложил вместо движущейся пленки в щелевом фотоаппарате использовать многокристалльную сборку матриц приборов с зарядовой связью (ПЗС), заряды в которых должны перемещаться синхронно с движением изображения. Щелевая конструкция фотоаппарата великолепно подходила для твердотельного фотоприемника, так как заполнить щель матрицами было много легче, чем заполнять всю фокальную плоскость! Более того, цифровые команды от БЦВМ, ранее предназначенные для управления вращением валика, теперьгодились для управления скоростью переноса зарядов в фоточувствительной матрице ПЗС. Была предложена передача цифровой видеoinформации по радиоканалу через спутник-ретранслятор на геостационарной орбите.

Для замены фотоплёнки на средства оптико-электронного фотографирования и оперативной передачи цифровой видеoinформации через спутник-ретранслятор в ЦСКБ-Прогресс был разработан КА Янтарь-4КС1 [6], Рис. 3.



**Рис. 3. КА Янтарь-4К1 разработки ЦСКБ-Прогресс с оптико-электронной цифровой фотокамерой Сплав и системой ретрансляции цифровой информации Сплав-1 разработки НПО ЭЛАС через спутник-ретранслятор «Поток» [7], Рис. 4.
(Фото с сайта: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Янтарь-4К1>)**



**Рис. 4. Спутник-ретранслятор «Поток» [7] на геостационарной орбите разработки НПО ПМ с радиоаппаратурой разработки НПО ЭЛАС
(Фото с сайта: [Поток \(космический аппарат\) — Википедия](#)[7]).**

К середине 70-х годов работы по созданию в Минэлектронпроме СССР элементной и приборной базы для разработки систем наблюдения Земли из Космоса развернулись в полную силу. Приказом министра автор был назначен Главным конструктором Минэлектронпрома по спецпрограмме «Сплав». Эта Программа была нацелена на разработку и организацию производства на предприятиях Минэлектронпрома новейших комплектующих изделий для будущих систем космического наблюдения. Для Минэлектронпрома было принципиально важно опробовать новейшие микроэлектронные изделия в космической системе. Министр Александр Иванович Шокин уделял пристальное внимание этой Программе. Он вдавался во все детали создаваемой системы и особенно интересовался требованиями к изделиям электронной техники в каждом узле системы. Было ясно, что для развития микроэлектронных систем космического назначения обязательно потребуется как углубление уже освоенных, так и освоения новых физических принципов микроэлектронной технологии.

4. Принцип синхронного накопления энергии движущегося изображения в матрице ПЗС

Идея реализации развёртки изображения в микроэлектронных фоточувствительных и излучающих приборах появилась в самом начале развития микроэлектроники. Сначала это была идея плоского телевизионного экрана. Она в наиболее доступной форме выражала основные принципы будущего направления развития микроэлектроники: групповое изготовление множества однотипных элементов в одном изделии, интеграцию функций соседних элементов, замену громоздких прототипов на малогабаритные изделия.

Но от этой перспективной идеи до ее практической реализации должно было пройти около двух десятков лет. Оказалось, развёртку сигналов изображения в плоском твердотельном устройстве удалось быстрее реализовать не в плоских экранах, а в фотоприёмной матрице на базе приборов с зарядовой связью. Приборы с зарядовой связью (ПЗС) изобретены в 1969 году Уиллардом Бойлом и Джорджем Смитом из BellLabs [8]. Первые приборы предназначались для видеотелефонии, и даже утверждалось, что новые фотоприёмные матрицы смогут в будущем помочь слабо видящим людям.

В технической литературе сообщалось о создании линеек и матриц ПЗС. При этом матрицы ПЗС работали в кадровом режиме, чередуя процессы запоминания изображения за время экспозиции кадра и последующей передачи зарядовых пакетов к выходному регистру, а через него и к выходному усилителю. Тактовые частоты переноса зарядов к выходному регистру и считывания зарядов из выходного регистра были фиксированы и подбирались из условия сопряжения со стандартной телевизионной системой, предназначенной для визуализации изображения.

Для работы в щелевом космическом аппарате требовался иной режим работы матрицы ПЗС. В отличие от линейки ПЗС, матрица могла обеспечить больше времени экспозиции. Чтобы избежать смаза изображения, бегущего по матрице, было предложено перемещать заряды вдоль столбцов матрицы со скоростью бега изображения. Я назвал этот принцип приёма движущихся изображений принципом синхронного накопления энергии движущегося изображения в матрице ПЗС. После экспериментальной проверки работоспособности предложенного принципа наш коллектив подал заявку на изобретение [9]. Пока шла экспертиза нашей заявки в Госкомитете по изобретениям, в литературе появились сообщения о реализации подобного режима считывания зарядов. Этот режим получил название: Временная Задержка и Накопление (ВЗН), или по-английски TimeDelayandIntegration (TDI).

При обсуждении новой идеи в ЦСКБ-Прогресс мы узнали об альтернативной идее считывания зарядов с фоточувствительной электростатической пленки с помощью гребенки из тончайших проволочек. Было очевидно, что наше решение гораздо изящнее и технологичнее и гарантирует меньший уровень шумов. Изучение имеющейся в библиотеках информации о чувствительности кремниевых фотоприемников и об освещенности Земли в разных областях спектра, в разное время суток и при разной погоде, позволило сделать оценки требуемого числа строк матрицы для накопления заряда в зависимости от размеров элементов и чувствительности матрицы ПЗС. Мы пришли к твердому выводу, что требуемое разрешение и число строк матрицы ПЗС с синхронным накоплением не превысят достигнутые в то время возможности микроэлектронной технологии.

Требовалось подтвердить теоретические оценки разрешающей способности и чувствительности проектируемого приёмника движущихся изображений на ПЗС. Нам стало известно, что в отделе Валентина Поспелова НИИ физических проблем есть готовые линейки ПЗС. Было решено спроектировать на линейку бегущее изображение и обеспечить продвижение зарядов вдоль нее синхронно с движением изображения. В кратчайшие сроки были разработаны схемы генератора тактовых импульсов с регулируемой частотой, имитатор бега местности со стабильной и контролируемой скоростью бега изображения, усилители сигналов, измерители освещенности.

Мы получили убедительные доказательства резкого возрастания выходного сигнала при точной синхронизации бега изображения и зарядов. Были получены значения фоточувствительности и кривые спада сигнала при рассинхронизации системы, Рис. 5. Полученные данные легли в основу методики проектирования будущего сверхширокоформатного оптикоэлектронного преобразователя бегущих изображений.

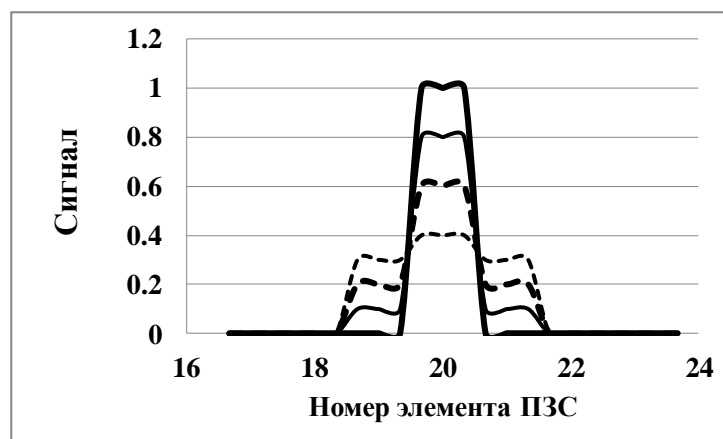


Рис. 5. Математическое моделирование влияния смаза изображения на величину и ширину отклика на одиночный импульс при отношении величины смаза к размеру фоточувствительного элемента ПЗС: 0 – толстая сплошная линия; 0,1 – тонкая сплошная; 0,2 – толстая штриховая; 0,3 – тонкая штриховая.

Как видно из результатов моделирования, смаз на одну десятую от ширины фоточувствительного элемента заметно снижает отклик и уширяет выходной сигнал, а смаз на одну треть вообще недопустим. Поэтому требовалась высокая точность синхронизации скорости переноса зарядов со скоростью бега изображения.

Вскоре НИИ Пульсар объявил о своей готовности принять наше техническое задание на разработку матриц ПЗС. Полученный при исследовании линеек опыт помог нам правильно сформулировать требования к матрицам, но нам на данном этапе не удалось уговорить специалистов НИИ Пульсар принять наши высокие требования по

однородности параметров матриц. Я был уверен, что прогресс технологии неизбежно приведет к росту однородности параметров ПЗС. Так было со всеми микрoeлектронными компонентами: огромные разбросы параметров на начальной стадии сменялись прекрасной однородностью по мере отработки технологии.

5. Принцип двухлинейного расположения матриц ПЗС

Чтобы заполнить всё пространство в фокальной плоскости щелевого фотоаппарата фоточувствительными матрицами ПЗС, работающими в режиме синхронного накопления энергии движущихся изображений, было предложено создать многокристальный приёмник движущихся изображений с двухлинейным расположением матриц ПЗС, Рис. 6. Чтобы избежать пробелов в изображении на границах соседних матриц было предложено размещать соседние матрицы с некоторым перекрытием. Лишнюю информацию должен был отбросить наземный комплекс.

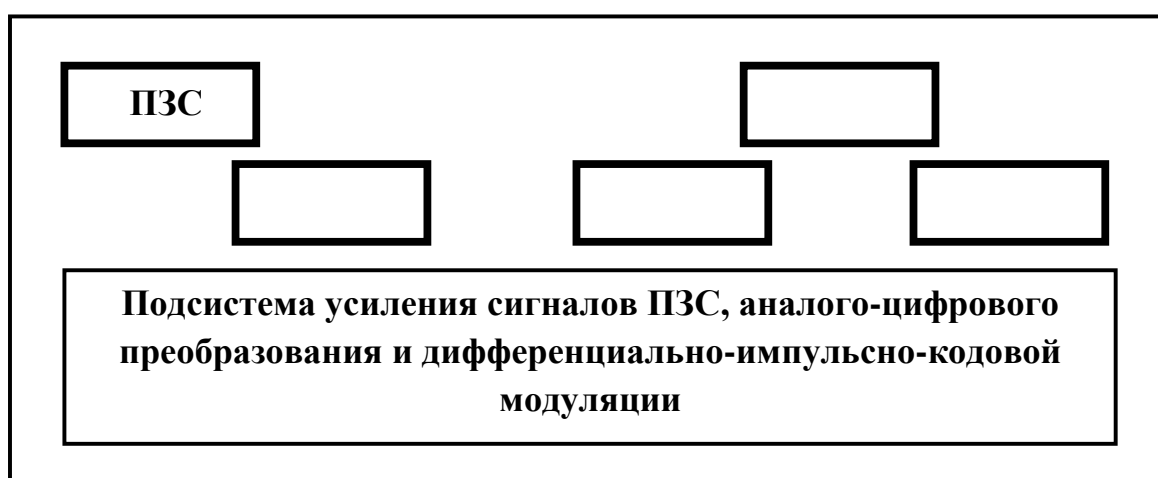


Рис. 6. Многокристальный сверхширокоформатный приёмник движущихся изображений с двухлинейным расположением матриц ПЗС с подсистемой усиления сигналов ПЗС, аналого-цифрового преобразования и дифференциально-импульсно-кодовой модуляции (ДИКМ).

6. Принцип многозональной компенсации смаза изображения при наклонной съёмке

При наклонной съёмке происходит смаз изображения на краях приёмника движущихся изображений из-за различия наклонных дальностей L_{\min} и L_{\max} от КА до различных участков подстилающей поверхности, Рис. 7. Смаз на краю изображения равен $\delta = w (1 - L_0/L_{\max})$, где w - ширина фоточувствительной матрицы, L_0 - расстояние до середины полосы съёмки, L_{\max} - расстояние до дальнего края полосы съёмки.

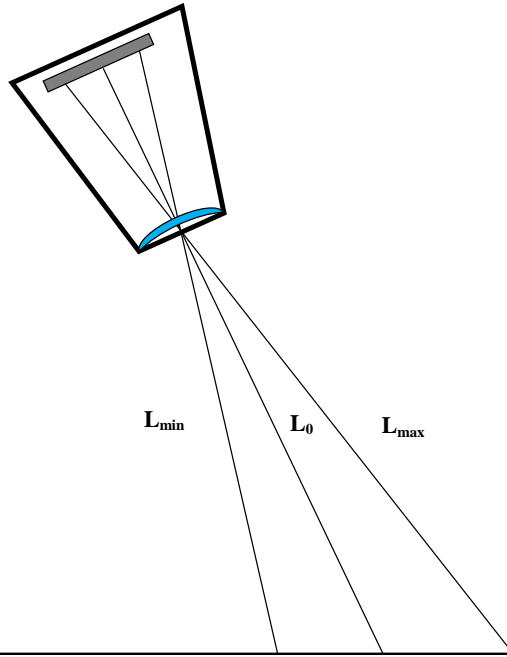


Рис. 7. Происхождение смаза изображения при наклонной съёмке.

С целью уменьшения величины смаза изображения при наклонной съёмке было предложено ввести многозональную синхронизацию скорости движущегося изображения со скоростями движения зарядов вдоль столбцов матрицы ПЗС. Теперь БЦВМ вычисляла не только скорость бега изображения по центру приёмника движущихся изображений, но и по центрам отдельных зон. Величина смаза изображения в результате упала пропорционально отношению ширины зоны к ширине всего приёмника движущихся изображений. Тем самым использование многозональной синхронизации частично компенсировало отставание ПЗС от фотоплёнки по разрешающей способности. В первом широкоформатном приёмнике движущихся изображений число зон равнялось трём. В дальнейшем, в связи с уменьшением размеров фоточувствительных элементов, требуется увеличение числа зон синхронизации скорости изображения.

7. Принцип уменьшения неоднородностей темновых токов и чувствительности элементов ПЗС при синхронном накоплении светового сигнала

Испытания ПЗС в режиме приёма движущихся изображений выявили положительный эффект снижения размаха неоднородности темновых токов и неоднородности чувствительности элементов. На первом этапе освоения технологии производства матриц ПЗС эти разбросы были неприемлемо велики, но режим синхронного накопления позволял снизить разбросы до приемлемых уровней. Особенно большой эффект достигается при наличии одиночных больших выбросов неоднородности. Усреднение такого выброса по столбцу матрицы ПЗС приводит к уменьшению его вклада в сигнал в n раз, где n – число элементов в столбце матрицы. По мере набора опыта производства ПЗС эти неоднородности были снижены. Реализация этого полезного эффекта говорит в пользу избранного метода накопления движущихся зарядов в приёмнике движущихся изображений.

8. Принцип дифференциального кодирования выходных сигналов ПЗС

Корреляция сигналов на выходе соседних элементов ПЗС, как по строке, так и по кадру, уменьшает диапазон разностного сигнала по сравнению с полным диапазоном

изменения видеосигнала. Это позволило сократить поток цифровой информации на выходе подсистемы приёма и преобразования информации. Поэтому было решено кодировать не каждый сигнал, а разницу между соседними сигналами. Этот метод дифференциальной импульсно-кодовой модуляции выходных сигналов ПЗС предложил и реализовал Леонид Гуторов. Для реализации метода существенную роль играло цифровое представление выходных сигналов, так как только цифровой сигнал можно было запомнить, как на время прихода соседнего элемента по строке, так и на время прихода следующей строки.

9. Принцип отсечения инфракрасной (ИК) составляющей спектра принимаемых изображений

Фоточувствительные приборы на основе кремния обладают высокой чувствительностью в ИК диапазоне вплоть до длины волны в 1,1 мкм, являющейся красной границей фоточувствительности кремния, Рис. 8. Однако, длинноволновые кванты света обладают большой глубиной проникновения в кремний из-за спада коэффициента поглощения с приближением к красной границе. Проникнув глубоко, кванты рождают электронно-дырочные пары, которые разделяются в поле управляющих электродов ПЗС, и диффундирующий к поверхности кремния заряд размывается по площади, превышающей площадь фоточувствительного элемента.

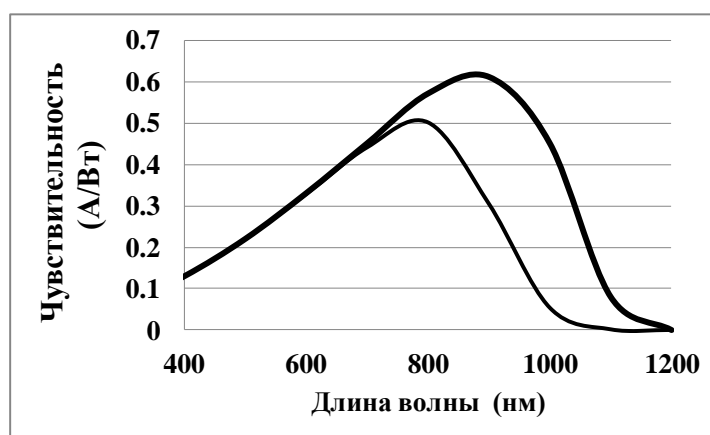


Рис. 8. Спектральная чувствительность кремниевых фотодиодов (толстая линия) и ПЗС за светофильтром, отсекающим ИК излучение (тонкая линия).

Для устранения этого эффекта размывания заряда приходится отрезать длинноволновую часть спектра в тем большей степени, чем меньше размер фоточувствительного элемента. Это существенно снижает чувствительность ПЗС, особенно при высоком разрешении матрицы, что делает применение механизма синхронного накопления особенно востребованным с ростом разрешающей способности ПЗС.

10. Принцип программной фокусировки фотоаппарата

Фотосъёмка поверхности Земли из Космоса происходит при большом отношении наклонной дальности к фокусному расстоянию. В результате этого расфокусировка изображения между крайними матрицами становится небольшой. Эта расфокусировка равна:

$$\Delta f = (f/L_0)^2 (L_{\max} - L_{\min}).$$

При $L_0/f = 10^5$ и $(L_{\max} - L_{\min}) = 20$ км $\Delta f = 2$ мкм. Такая малая величина расфокусировки позволяет производить программную фокусировку по центру изображения, используя данные о наклонной дальности из БЦВМ. Неоднородности

высоты подстилающей поверхности много меньше взятой для оценки расфокусировки величины ($L_{\max} - L_{\min}$), поэтому они также не влияют на точность фокусировки по длине приёмника движущихся изображений, но средняя высота может быть учтена БЦВМ при расчёте требуемого сдвига фокуса по центру приёмника..

Для оценки допустимой величины расфокусировки рассмотрим размер пятна d в фотоприёмной плоскости от точечного источника на Земле с учётом дифракционной расходимости лучей в зоне фокусировки в зависимости от расфокусировки Δf .

$$d = ((D/f \Delta f)^2 + (\lambda/D (f + \Delta f))^2)^{0.5}.$$

Здесь D = диаметр объектива, а λ – средняя длина волны спектра принимаемых излучений с учётом усреднённого спектра отражённого от поверхности Земли солнечного излучения, спектральной характеристики объектива и спектральной чувствительности ПЗС матрицы.

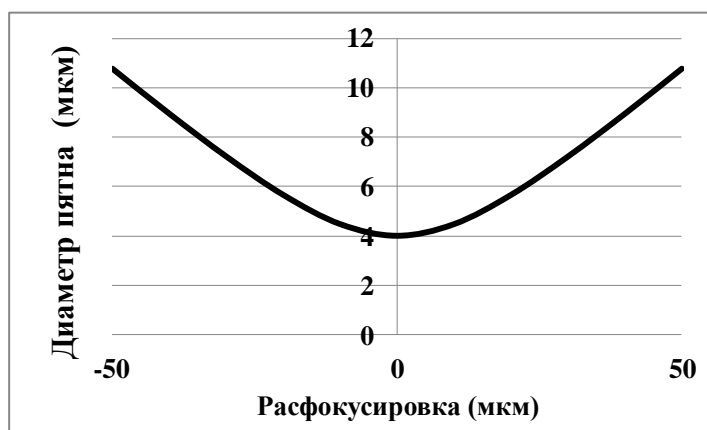


Рис. 9. Размер светового пятна от точечного источника с учётом дифракционной расходимости и расфокусировки.

В связи с большой шириной спектра принимаемых излучений от Земли в линзовом объективе проявляются спектральные aberrации, которые могут превышать величину дифракционного расхождения. При этом характер зависимости размера светового пятна останется тем же, что и на Рис. 9, только возрастёт величина минимума кривой при нулевой расфокусировке. Поэтому более точная оценка дифракционного расхождения нецелесообразна.

11. Принцип избыточной разрешающей способности наземного фоторегистратора

Цифровой тракт передачи информации не вносит искажений в передаваемую от фотоприёмника информацию. Поэтому кроме фотоприёмника на качество изображения существенно влияет система фоторегистрации. В связи с высокой стоимостью космической системы наблюдения нежелательно снижение разрешающей способности снимков в процессе фоторегистрации. Поэтому наземный фоторегистратор должен обладать высоким коэффициентом передачи контраста в зоне наиболее высоких пространственных частот, воспринятых приёмником движущихся изображений.

Всеобщий переход к электронному документообороту устраняет необходимость 100%-ной фоторегистрации принятой информации. Вместо этого удобнее использовать цифровые запоминающие устройства и анализ изображений с помощью мониторов и проекторов. На долю фоторегистратора остаётся печать выбранных фрагментов с увеличением масштаба снимка, что снижает требования к частотным характеристикам фоторегистратора.

12. Обеспечение сквозных характеристик системы опико-электронного наблюдения с передачей цифровой информации через спутник-ретранслятор

В разработанных нами в 1974 году технических предложениях по созданию новой системы наблюдения был рассмотрен весь тракт наблюдения, начиная с приёмника движущихся изображений на ПЗС, включая аналого-цифровое преобразование, накопление и передачу цифровой информации по радиоканалу от спутника-наблюдателя через спутник-ретранслятор на наземный пункт приёма, обработки цифровой информации и фоторегистрации. Спустя 9 лет идея была подтверждена успешной работой первой цифровой системы космического наблюдения [10-12].

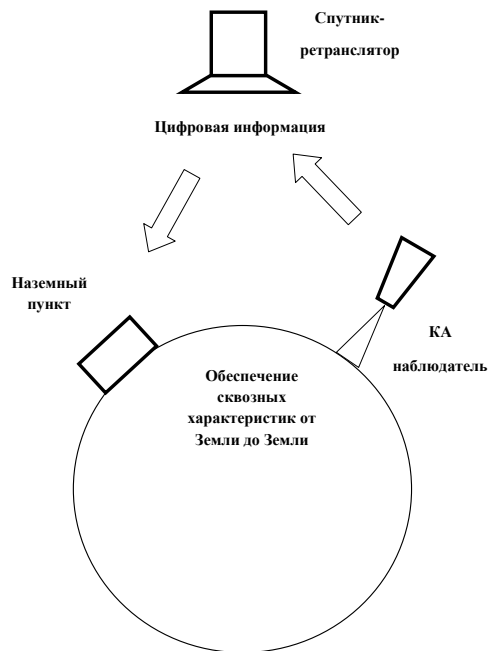


Рис. 10. Сквозной тракт приёма движущихся изображений, преобразования, передачи цифровой информации через спутник-ретранслятор на наземный пункт приёма и обработки цифровой информации и фоторегистрации.

Заказчику требуется обеспечение «Сквозных характеристик системы», а не выполнение частных требований к приёмнику движущихся изображений и другим подсистемам. Я стал ответственным за сквозные характеристики создаваемой системы. Требовалось рассчитать характеристики матриц ПЗС, характеристики многокристального приёмника движущихся изображений, разрядность и скорость преобразования аналого-цифрового преобразователя, ёмкость бортового накопителя и поток цифровой информации, скорость передачи информации на спутник-ретранслятор с учётом ограничений по потребляемой мощности передатчика и габаритам передающей и приёмной антенн. Требовалось обеспечить наземную обработку цифровой информации с учётом специфики приёмника движущихся изображений и системы передачи цифровой информации. Особое внимание было уделено сопряженной схеме наземного многокристального фоторегистратора на базе линеек светодиодов, зеркально отражающего конструкцию опикоэлектронного преобразователя. Но светодиодный фоторегистратор был определён, как запасной вариант, а в качестве основного варианта был избран стандартный фоторегистратор.

Наземный комплекс обработки цифровой информации должен был привести двухлинейную структуру видеoinформации к однолинейной для сопряжения со стандартным фоторегистратором. Для этого информация от матриц ПЗС с чётными

номера задерживалась на фиксированное число тактов по отношению к информации от нечётных матриц. Кроме того, наземный комплекс должен был отбросить лишнюю информацию, возникавшую из-за перекрытия матриц, а также вводимую для согласования нестабильной скорости считывания информации из бортового накопителя с фиксированной скоростью передачи информации по космической линии связи.

Наземный комплекс также должен был оценивать величину сигнала от дымки и вычитать её для повышения контраста регистрируемых изображений. Это выгодно отличало оптико-электронное фотографирование от фотографирования на фотоплёнку.

Никто из предприятий космической отрасли не мог взять на себя ответственность определить требования на составные подсистемы и элементы для создаваемой глобальной системы космического наблюдения. Впервые создавалась цифровая система передачи видеoinформации, получаемой от никому неизвестного приёмника движущихся изображений. Возникла парадоксальная ситуация: Минэлектронпром, ранее только поставлявший элементную базу для разработчиков аппаратуры, теперь выходил на роль ведущего в создании важнейшей космической системы. Геннадий Яковлевич Гуськов отреагировал на это, создав в 1975 году НПО ЭЛАС (Электронной Аппаратуры и Систем), в которое вошли наряду с НИИ микроприборов и заводом Компонент также Солнечногорский Электромеханический завод и Конаковский Полигон испытаний аппаратуры.

Чем больше становился размах работ, тем острее звучали вопросы о сквозных характеристиках будущей системы. Нужны были испытания экспериментального образца оптико-электронного преобразователя в условиях, приближенных к реальным. Заказчики выдали нам для экспериментов объектив того типа, что летали на первых фотографических спутниках Зенит. Компьютерная обработка движущихся изображений позволила доказать, что разрешение и чувствительность ПДИ соответствуют теоретическим оценкам, положенным в основу проекта системы Сплав. Главным достижением этих экспериментов была демонстрация того, что неоднородности темновых токов и чувствительности отдельных элементов матрицы сглаживались благодаря эффекту синхронного накопления, что давало еще большую уверенность в правильности избранного пути! Более того, эти неоднородности оказалось возможным запомнить в компьютере и исключить при цифровой обработке изображения. Так рождалась цифровая фотография движущихся изображений [12].

Большие споры вызвал выбор предприятия, ответственного за разработку и создание комплекса наземной аппаратуры системы Сплав. Окончательно остановились на НИИ точных приборов Минобщемаша [13]. Я сформулировал требования к наземной аппаратуре. И здесь не обошлось без курьезов. Мы уже использовали в своей экспериментальной аппаратуре интегральные схемы памяти с ёмкостью свыше 1 кбит, а разработчики из НИИТП говорили, что могут применять ЗУ с ёмкостью не более 128 бит в корпусе, так как более ёмкие микросхемы ещё не вошли в список разрешённых к применению. Геннадий Яковлевич использовал свой огромный авторитет для разрешения этой бюрократической проблемы. Без ее решения пришлось бы забить огромный зал шкафами ЗУ для промежуточного хранения и обработки принимаемой от ретранслятора цифровой информации.

13. Принцип опережающей разработки элементной базы для дальнейшего совершенствования системы

В НИИ микроприборов под руководством И.И. Петручука были созданы собственные фоточувствительные приборы с зарядовой связью. Это позволило нам на профессиональном уровне взаимодействовать, как с разработчиками ПЗС из других организаций, так и со специалистами по космической фотографии. Мы выдали в НИИ

Пульсар не одно техническое задание, а сразу три с поэтапным наращиванием разрешающей способности матриц ПЗС в 1,5-2 раза. Это было сделано для того, чтобы для начала летных испытаний системы иметь хотя бы синицу в руке, а только в дальнейшем ухватить и журавля с неба. Первое поколение матриц соответствовало уже достигнутым топологическим возможностям НИИ Пульсар, хотя и требовало напряженной работы по доведению их параметров до уровня требований системы. Мне пришлось отбиваться от нападков заказчиков, которые утверждали, что такие матрицы их не удовлетворят. Я понимал, что при ужесточении требований по разрешающей способности мы поставим технологов перед невыполнимой задачей и не будем иметь ни качественных матриц ПЗС, ни самой системы к заданным срокам летных испытаний. Геннадий Яковлевич Гуськов поддерживал меня в этом, считая, что летные испытания нельзя откладывать, так как они предназначены для отработки взаимодействия всех подсистем системы Сплав.

Жизнь подтвердила правильность нашей стратегии. Качество изображений, доставленных самым первым спутником, превзошло ожидания заказчиков. Дело в том, что они привыкли к оценке качества изображений на фотопленке с её низким контрастом при высоком разрешении и с её смазом изображения на краях фотоплёнки, а матрицы ПЗС гораздо лучше передавали контраст, хотя и при меньшем предельном разрешении и не давали смаза. Они дали высокую оценку и фоторегистратору на светодиодных линейках, разработанному в лаборатории К. Ш. Еникеевой. Уже второй космический аппарат был укомплектован матрицами более высокого разрешения.

В Ригу и Вильнюс были выданы задания на организацию промышленного производства аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, которые впоследствии активно использовались нами не только для системы Сплав, но и во многих других разработках. В то время невозможно было себе представить, что дружественные нам коллективы всего через 15 лет окажутся за границами нашей страны, а налаженная кооперация лопнет.

Была развернута мощная подпрограмма по становлению технологии волоконнооптических линий связи, как в части самого волокна, так и оборудования для его производства и контроля. Высокое затухание сигналов в первых образцах оптоволокон не останавливало нас из-за малой длины линий связи на борту КА. Сегодня, когда мы видим колоссальные успехи и масштабы применения волоконной оптики, наше решение развивать в 70-е годы это направление выглядит исключительно ценным. К сожалению, разруха 90-х годов подорвала это направление в нашей стране и поставила Россию в ряд покупателей зарубежного оптоволокон.

После нескольких неудачных попыток подключить НПО «Электрон» к нашей разработке удалось выдать техническое задание на разработку охлаждаемых формирователей сигналов изображений для перспектив увеличения чувствительности системы. Через ряд лет и НПО «Электрон» пополнило ряды разработчиков матриц ПЗС, а сегодня является ведущим предприятием страны в этом направлении.

Мощные твердотельные лазеры и сверхбыстродействующие фотоприемники для космической лазерной линии связи разрабатывались в НИИ Полюс под руководством его директора Митрофана Федоровича Стельмаха и начальника отдела Валентина Георгиевича Дмитриева. Позднее в эту работу включилось и зеленоградское НПО Zenit. Но здесь мы опередили время на несколько десятилетий. Лазерные линии связи, несомненно, в скором времени будут активно использоваться в Космосе, но в те годы создать их было невероятно трудно. При Президиуме Академии Наук СССР была создана Комиссия по космической лазерной связи под руководством академика Велихова Евгения Павловича, в которую наряду с рядом крупных ученых и специалистов вошли Митрофан Федорович Стельмах, зам. Руководителя НПО ПМ

Григорий Маркелович Чернявский и я. Но в то время оказалось предпочтительнее использовать космическую радиосвязь, для которой уже была готова элементная база.

Разработка сложной космической системы одновременно с разработкой изделий электронной техники оправдала себя и была названа нами принципом сопряжённой разработки сложных систем и комплекующих изделий [14].

14. Принципы проектирования антенных фазированные решетки для передачи цифровой информации через спутник-ретранслятор

К середине 70-х годов НИИ микроприборов достиг колоссальных успехов в создании активных антенных фазированных решеток (АФАР) для правительственной связи через спутники-ретрансляторы «Молния-1». Уже были установлены антенные фазированные решетки на правительственных автомобилях и самолетах. По этой технологии была осуществлена радиосвязь между атомоходом «Ленин» и Москвой из района Северного полюса. Был накоплен существенный задел для использования АФАР в системах передачи цифровой видеoinформации: освоен диапазон частот в районе 1 ГГц, для которого освоен выпуск мощных передающих и маломощных высокочувствительных транзисторов, в НИИ микроприборов отработана и внедрена на завод технология гибридных СВЧ микросхем, создана мощная измерительная база.

Но одно дело - использовать антенные решетки для обеспечения телефонной связи, совсем другое – для передачи широкоформатных изображений. Здесь требовалась в десятки тысяч раз большая скорость передачи информации. Для уменьшения нагрузки на линию космической связи было принято решение замедлять поток цифровой информации от оптико-электронной подсистемы с помощью буферного запоминающего устройства. Общее время съёмки на витке было много меньше периода витка, что обеспечивало возможность замедления передачи информации. Расчёт требуемой скорости передачи информации с учетом этого замедления дал оценку размеров антенн спутников и потребляемой мощности. При этих расчетах в качестве шумовой температуры приемников была принята в десять раз большая величина, чем температура окружающей радиоприёмник среды. Даже с учетом этого запаса размеры антенн и потребляемые ими мощности уложились в приемлемые диапазоны. Указанный запас обеспечил большое время жизни спутника-ретранслятора даже в условиях снижения эффективности солнечных батарей под действием космической радиации.

Для передающей антенны со спутника-наблюдателя по предложению И.С. Фадеева было решено совместить ступенчатую механическую переориентацию антенны в пределах 180 градусов с плавным электронным качанием луча в пределах 20 градусов. Это было вызвано большим диапазоном разворота корпуса спутника-наблюдателя на орбите по отношению к направлению оси визирования спутника-ретранслятора. А плавное электронное управление лучом во время передачи информации было необходимо для минимизации механического воздействия со стороны антенны на линию визирования космического фотоаппарата. Моменты ступенчатой переориентации антенны должны были происходить задолго до сеанса предстоящей съёмки, чтобы возникшие вибрации оси визирования фотоаппарата успели затухнуть.

При проектировании спутника-ретранслятора в НПО ПМ пришлось принять во внимание, что антенна должна вписаться своими габаритами в вагон для перевозки спутника к месту старта. Многочисленные туннели и мосты вдоль железной дороги никто не будет переделывать ради уникального спутника. Мы вписали восьмиугольную антенну в чертеж вагона и после этого приступили к расчету параметров космической линии передачи цифровой информации с учетом выбранного размера антенны в 3 метра. Готовность НПО ПМ создать спутник-ретранслятор с требуемыми для системы

Сплав характеристиками открывала совершенно новые возможности для систем космического наблюдения.

Приятно видеть, что идея межспутниковой связи, заложенная в проект системы Сплав еще в 1974 году, пережила эпоху безденежья последних 20 лет и вновь возродилась на предприятии "Информационные спутниковые системы имени Решетнева" (сокращенно:ИСС, а ранее - НПО ПМ) в виде системы спутников-ретрансляторов нового поколения "Луч" [15].

15. Принцип выбора пропускной способности линии космической связи

На Рис. 11 показана линия радиосвязи между КА наблюдателем и спутником-ретранслятором. Антенна АФАР₁ КА наблюдателя с размером ДА₁отклонена механически относительно его корпуса, а излучаемый ею радиолуч отклонён от её плоскости путём электронной регулировки фаз излучателей. Дифракционная расходимость луча

$$\alpha_\lambda = \lambda/ДА_1.$$

Эта расходимость создаёт на орбите спутника-ретранслятора радиопятно с диаметром ДП = $\alpha_\lambda L$. При дифракционной расходимости луча около 0,2 радиана и расстоянии между спутниками около 36 тысяч километров диаметр пятна составит примерно 7200 км.

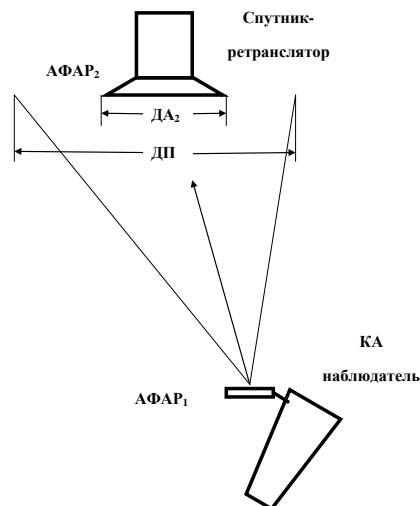


Рис. 11. Линия космической радиосвязи между АФАР₁ КА наблюдателя и АФАР₂ спутника-ретранслятора.

При скорости передачи информации равной I бит/с мощность шума, приведённая к входу приёмника ретранслятора составит $P_n = k_B T_{eff} I$, где k_B – константа Больцмана, $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, T_{eff} – эффективная шумовая температура с учётом собственных шумов приёмника и паразитных шумов. В нашем расчёте T_{eff} была оценена с 10-кратным запасом по сравнению со средней температурой среды, окружающей приёмник, $T_{eff} = 3000$ К. Спроектированная линия связи обеспечила требуемую скорость передачи информации при хорошем запасе по величине отношения сигнала к шуму.

16. Переход от линзовых фотоаппаратов к зеркальным телескопам

Освоенная технология изготовления приёмников движущихся изображений на ПЗС позволила перейти от линзовых объективов к зеркальной оптике. Это давало возможность увеличить фокусное расстояние телескопа и расширить спектральный диапазон, включая освоение многоспектрального режима съёмки. Именно идея использования приборов с зарядовой связью вместо фотопленки сделала такие телескопы с широким спектральным диапазоном востребованными, поскольку

твёрдые фотоприемники обеспечивали более широкий спектральный диапазон, чем фотопленка.

Разработка космических телескопов была поручена гиганту отечественной оптической промышленности — Ленинградскому Оптико-Механическому Объединению (ЛОМО) [16], а для настройки телескопа после выведения в Космос предстояло разработать комплект из 15 цифровых формирователей сигналов изображений (ФСИ), которые должны были измерять отклонения положения деталей телескопа от проектных величин. Облегченная конструкция космического телескопа после вывода в Космос не была способна сохранить свои размеры, что могло нарушить юстировку телескопа. Требовалось обеспечить точность измерения координат юстировочных изображений на два порядка выше разрешающей способности используемых в ФСИ матриц приборов с зарядовой связью.

Эта работа была поручена НИИ физических проблем, где отдел компьютеризации научных исследований имел большой опыт в создании разнообразных формирователей цифровых сигналов на базе матриц и линеек приборов с зарядовой связью (ПЗС). Мы разработали опытные образцы ФСИ и методы компьютерной калибровки ФСИ, при которой запоминались и компенсировались неоднородности параметров матриц [17]. Это позволило измерять координаты тестовых изображений по алгоритмам, предложенным специалистами ЛОМО, с точностью на три порядка выше разрешающей способности матриц. Результаты наших работ были переданы в ЛОМО. Началось создание контрольно-измерительной аппаратуры. И здесь наш задел оказался весьма полезным, даже в части оптических измерений. Специалисты ЛОМО сначала не соглашались с нами, что для источника равномерной облученности ФСИ не требуется никакая оптика. Мы предложили собрать матрицу из светодиодов и поместить ее на расчетном расстоянии от испытываемой матрицы ПЗС. К великому удивлению специалистов ЛОМО, полученная равномерность облучения матриц оказалась гораздо выше точности их измерительных приборов.

Космический телескоп успешно работал в составе КА Аракс [18].

17. Некоторые перспективные направления развития

1. Создание космического кольца сверхширокополосной цифровой связи для ретрансляции информации с низколетящих спутников. Такое кольцо может располагаться на промежуточной высоте между геостационарной и низкой орбитами. К примеру, на высоте около 5 тысяч км. Снижение высоты орбиты кольца приведёт к сокращению расстояния между ближайшими спутниками. Сложность наведения луча при этом не должна пугать, так как применение активных фазированных антенных решёток позволит избежать механического наведения. Расположение колец в меридиональных плоскостях позволит использовать высокую пропускную способность наземных и подводных ВОЛС, действующих в основном вдоль параллелей.

2. Создание орбитальных станций наблюдения поверхности Луны или Марса позволит сочетать большой срок существования таких станций с их высокой разрешающей способностью благодаря отсутствию сопротивления атмосферы на высотах менее 200 км. Постоянное наблюдение за поверхностью Марса или Луны может помочь при подготовке экспедиций космонавтов или роботов на саму поверхность.

3. Наблюдение за состоянием и движением льдов и облаков в Арктике со спутников на околополярных орбитах позволит уточнить прогнозы погоды, поможет движению судов вдоль Севморпути, повысит безопасность рыболовства, нефте- и газодобычи в Арктике.

Данная лекция показывает, что в нашей стране есть высокий потенциал и богатый опыт создания принципиально новых космических систем и аппаратуры. Перед мыслящими гражданами России сегодня поставлен исторический вызов: как найти пути развития страны, особенно в сфере высоких технологий. Это и есть сверхзадача; когда она завладеет мыслями учёных, специалистов и студентов, тогда и можно будет надеяться на возрождение страны.

Литература

- [1] Зенит (космический аппарат). Электронный ресурс: Зенит (космический аппарат) — Википедия
 - [2] ЦСКБ-Прогресс официальный сайт. <http://www.samspace.ru/>
 - [3] Козлов Дмитрий Ильич. Электронный ресурс: Козлов, Дмитрий Ильич – Википедия
 - [4] Спутники «Янтарь». Электронный ресурс: <http://www.cosmoworld.ru/spacehistory/projects/yantar.html>
 - [5] Гуськов Геннадий Яковлевич. Электронный ресурс: Гуськов, Геннадий Яковлевич – Википедия
 - [6] Янтарь-4КС1М. Электронный ресурс: Янтарь-4КС1М – Википедия
 - [7] Поток (Космический аппарат). Электронный ресурс: Поток (Космический аппарат) – Википедия
 - [8] Дж. Е. Смит. История изобретения приборов с зарядовой связью // *УФН*. — 2010. — Т. 180. — С. 1357—1362.
 - [9] Гуськов Г.Я., Седунов Б.И., Петручук И.И., Возьмилов П.Н. Фотоприемник движущегося изображения (Патент SU 587637).
 - [10] История Зеленограда, 1983 год. Электронный ресурс: История Зеленограда. Глава 63. [1983] Ритм города — 83
 - [11] Седунов Б.И. Серия статей о создании в Зеленограде аппаратуры и систем космического назначения. Электронный ресурс: <http://zlngrd.ru/author/394>
 - [12] История цифровой фотографии. Электронный ресурс: История цифровой фотографии - Википедия
 - [13] ОАО НИИ точных приборов. Электронный ресурс: <http://www.niitp.ru/>
 - [14] Г.Я. Гуськов и Б.И. Седунов, Проектирование сложной микроэлектронной аппаратуры. *Электронная промышленность* 1977.
 - [15] Многофункциональная космическая система ретрансляции «Луч». Электронный ресурс: Многофункциональная космическая система ретрансляции «Луч» - Википедия.
 - [16] ЛОМО – производство оптических приборов. Электронный ресурс: <http://www.lomo.ru/site/index.php?ct=0>
 - [17] Тишин Ю.И., Седунов Б.И., Сафонов А.Г., Ракитин В.В., Васенков А.А. Устройство для определения координат изображения, патент № 3711566/09 (22) от 16.03.84.
 - [18] Аракс (КА). Электронный ресурс: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/34367>
-