

Концепции развития космических электронных систем оперативного детального наблюдения

Б.И. Седунов

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

Данная лекция идёт в развитие лекций автора, прочитанных перед слушателями Молодёжной школы в рамках Армандовских чтений 2015 и 2017 годов по проблемам дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн. Лекция опирается на опыт создания системы "Сплав" оперативного детального наблюдения поверхности Земли и предлагает концепции дальнейшего развития систем космического наблюдения. Среди этих концепций: упрощённые и облегчённые оптические системы с высокой разрешающей способностью; матрицы ПЗС на основе гетероструктур с расширенным спектральным диапазоном; матрицы ПЗС со сверхразрешением; гигабитная лазерная сеть спутниковой связи для ретрансляции информации от спутников оперативного наблюдения; прецизионное наведение лазерного луча на основе матриц ПЗС; динамическая фазированная антенная решётка на базе нежёсткой многоспутниковой системы.

The lecture develops ideas of lectures, delivered in 2015 and 2017 by the author for the Young scientists' school in frames of the Nat. Armand readings on remote sensing, wave propagation and diffraction. The lecture is based on the Earth surface detailed observation system "Splav" creation experience and suggests concepts for space observation systems future development. Among these concepts are: the high resolution less weight and complexity optical systems; heterostructures based CCD matrices with an expanded spectral range; super-resolution CCD matrices; Gigabit laser satellite communication network for information transfer from space observation satellites; CCD matrices based laser beam precise guidance; dynamic phase array antenna based on the non-rigid multi-satellite system.

Введение

Эта лекция является продолжением и развитием лекций: "Принципы, заложенные в основу первой отечественной цифровой системы дистанционного зондирования Земли из Космоса и цифровых формирователей сигналов изображений для космических телескопов" [1] и "Цифровая революция в наблюдении поверхности Земли из Космоса" [2], прочитанных автором на Молодёжной школе в рамках Армандовских чтений в 2015 и 2017 годах.

Лекция опирается на опыт создания системы детального оперативного наблюдения "Сплав" [3], обеспечившей передачу через геостационарный спутник-ретранслятор "Гейзер" цифровой информации со спутника-наблюдателя "Янтарь-4КС1", и на монографию "Космическое аппаратостроение: Научно-технические исследования и практические разработки АО «РКЦ Прогресс»" [4], отражающую историю развития техники космического фотографирования и современное состояние космического электронного оперативного наблюдения. За последнее десятилетие вышло много книг, статей и публикаций в Интернете, отражающих историю и современное состояние технологии фотографирования и видеонаблюдения поверхности Земли из Космоса. Эта информация помогает оценить перспективы развития данной технологии.

Лекция посвящена концепциям дальнейшего развития космических систем детального оперативного наблюдения поверхности Земли, Луны и планет Солнечной системы. Анализ перспективных концепций развития сложных систем особенно важен при подготовке молодых специалистов в сфере разработки и совершенствования космических систем дистанционного зондирования (ДЗ).

Автор видит перспективы лазерной сети спутниковой связи с высотой орбиты порядка 2000 км, предназначенной для магистральной ретрансляции гигабитных потоков цифровой информации с ниже летящих спутников космического наблюдения и спутниковой связи. Автор предлагает усовершенствовать оптическую систему спутника-наблюдателя и развить потенциал матриц приборов с зарядовой связью (ПЗС) в части повышения разрешающей способности и расширения спектрального диапазона космических систем оперативного наблюдения, обеспечения сверхточного наведения лазерного луча и контроля взаимного положения малых спутников в нежёстко связанной многоспутниковой системе.

Рекомендации автора лекции опираются на его активные роли в разработках сложных космических систем оперативного наблюдения, такие как:

Автор идеи оперативного детального космического наблюдения на базе матриц ПЗС с синхронным накоплением энергии движущихся изображений и ретрансляции цифровой информации через 3 геостационарных спутника-ретранслятора (1973 г.).

Разработчик требований к матрицам ПЗС с синхронным накоплением энергии движущихся изображений (1974 г.).

Главный конструктор технического предложения и эскизного проекта системы "Сплав" [3] (1974 – 1980 г.г.).

Автор технических требований к спутнику-ретранслятору "Гейзер" и к наземному комплексу приёма, обработки и регистрации специнформации (1975 г.).

Главный конструктор спецпрограммы "Сплав" МЭП СССР по обеспечению системы "Сплав" новейшими изделиями электронной техники (1975 – 1980 г.г.).

Главный конструктор комплекса формирователей сигналов изображений (ФСИ) телескопа ЛОМО для высокоорбитального КА "Аракс" (1981 – 1990 г.г.).

1. Ведущая роль ракетно-космической техники в развитии отраслей высокой технологии

Ракетно-космическая техника – это системообразующая отрасль, видящая свои цели и способная поставить цели смежным отраслям, включая электронную промышленность. 60 лет назад началось создание города Зеленограда, нацеленного на обеспечение элементной базы для ракетно-космической техники. Участие предприятий Зеленограда в создании электронных систем дистанционного зондирования Земли и Луны и космического фотографирования дало мощный импульс в их развитии.

Концепции пилотируемых и беспилотных космических систем

В спорах, что важнее, пилотируемые или беспилотные космические системы, часто не видят разницы в их задачах и функциях. По мнению автора:

Задача пилотируемых систем – это, в первую очередь, отработка технологий обеспечения безопасных и комфортных условий жизнедеятельности космонавтов, исходя из идей Константина Эдуардовича Циолковского о неизбежности освоения человеком космического пространства.

Основная тенденция развития пилотируемой космонавтики – увеличение размеров космических аппаратов и космических систем и мощности ракет для освоения Луны и планет Солнечной системы. Этому направлению работ приходится преодолевать огромные физические и экономические барьеры.

Задача беспилотных систем – это решение многообразных прикладных и научных задач с опорой на достижения ракетной техники, электроники и оптики, радиотехники, компьютеров и компьютерных сетей, систем искусственного интеллекта.

Наиболее востребованные направления использования беспилотных космических аппаратов - получение, обработка и передача больших потоков данных дистанционного зондирования, требуют опережающего обеспечения наивысшего уровня космического электронного аппаратостроения.

Перспективы развития беспилотной космической техники – массовое производство облегчённых аппаратов и их согласованное действие в глобальных системах. Беспилотная космическая техника опирается на электронную и радио промышленности, на новейшую компьютерную технику и компьютерные сети, на информационные технологии и искусственный интеллект. Для вывода на орбиту беспилотных аппаратов, таких как фотографические спутники серии "Зенит" [4], используют серийно освоенные ракеты, такие как ракета-носитель "Восток", подтвердившая свою высокую надёжность (рис.1). Такое развитие – беспредельно!



Рис. 1. Ракета-носитель "Восток", обеспечившая вывод на орбиту серии беспилотных фотографических спутников "Зенит" [4].

Роль электронного аппаратостроения в космической отрасли

Полёт ракеты и космического аппарата требует сложнейшей электронной системы автономного и внешнего управления;

Часто цитируют слова академика, главного конструктора ракетных двигателей Валентина Петровича Глушко:

«Если есть ракетный двигатель, то к нему хоть забор привяжи — он полетит!»

Но для полёта ракеты в не меньшей мере, чем двигатель, необходима и аппаратура управления для преодоления неустойчивости её движения из-за расположения двигателя в хвостовой части ракеты.

Важнейшая задача современного этапа развития комплекса «космическая техника - электронная промышленность РФ» – преодоление зависимости от мирового рынка электронных комплектующих изделий и выход на собственный путь развития.

Ориентация на традиционные технические идеи и решения бывает причиной большого отставания. Так, включение космонавтов в процесс анализа и отбора фотоснимков на борту орбитальной пилотируемой станции (ОПС) "Алмаз" [5] привело к её колоссальному усложнению, снижению надёжности и производительности.

Наоборот, компьютеризация процесса съёмки и передачи информации в системе "Сплав" [2, 3] привела к эффективному решению проблемы оперативного наблюдения! Следует заметить, что версия ОПС "Алмаз" [5] от 1991 г. использовала отработанную в системе "Сплав" [2, 3] технику передачи информации через спутник-ретранслятор.

Как важно своевременно распознавать дезинформацию

В 60-х годах прошлого века ложная идея создания транзисторов на основе тонких плёнок полупроводников группы A_2B_6 отвлекла большие силы наших разработчиков от основного направления – кремниевой технологии.

В 80-е годы идея Звёздных войн отвлекла огромные материальные и интеллектуальные ресурсы нашей страны на разработку мощных лазеров воздушного и космического базирования.

При этом развитию лазерной космической связи не уделялось достаточного внимания. Но современные успехи построения многоканальных ВОЛС выявили огромный потенциал лазерной связи. Необходимо адаптировать в космической электронике достижения научной школы Ж.И. Алфёрова [6] в части создания эффективных лазеров для многоканальных терабитных сетей!

2. Анализ опыта создания системы "Сплав"

Беспилотное космическое наблюдение против пилотируемых станций

Система "Сплав" родилась на острие соперничества между орбитальной пилотируемой станцией "Алмаз" [5] и космическими аппаратами-роботами "Зенит" [4]. КА "Зенит" сбрасывали на Землю кассеты с фотоплёнкой, поиск которых занимал много времени [4]. А фототелевизионная система станции "Алмаз" [5] не могла обойтись без космонавтов, которые отбирали наиболее информативные участки кадра для передачи их по радиолинии при пролёте над наземным пунктом. Система "Сплав" решила задачу оперативной передачи изображений на Землю без участия космонавтов [3, 4]!

Концепция космических систем на новых физических принципах

Космические системы дистанционного зондирования относятся к классу сложных систем, чем бывает вызвано тяготение их разработчиков к компонентам, уже подтвердившим свою надёжность. Огромное число электронных компонентов в системе повышает требования к их надёжности, что заставляет использовать проверенные электронные изделия, освоенные в массовом производстве [7].

Но, для достижения требуемых высоких характеристик перспективных систем дистанционного зондирования бывает необходимо применять в проектируемой системе новейшие компоненты, включая работающие на новых физических принципах [7].

Пример системы на новых физических принципах

В базовом элементе системы "Сплав" - фоточувствительной матрице приборов с зарядовой связью (ПЗС), использован неизвестный ранее физический принцип

синхронного накопления энергии движущегося изображения [1, 3, 8], называемый сегодня, как режим временной задержки и накопления (ВЗН).

Базовый элемент – это такое принципиально новое комплектующее изделие, которое определяет структуру создаваемой системы и её основные характеристики [12].

В системе "Сплав" таким элементом стала матрица приборов с зарядовой связью (ПЗС), работающая в режиме синхронного с бегом изображения накопления энергии движущегося изображения [1, 3, 8].

Успех проектирования перспективной системы ДЗ зависит от удачного выбора её базовых элементов! Базовые элементы определяют структуру всей проектируемой системы. Проектирование и экспериментальная отработка новой системы должны проходить параллельно с разработкой и совершенствованием технологии изготовления новых электронных изделий, в соответствии с концепцией сопряжённого проектирования сложной системы в целом и её базовых компонентов [9].

Вера во всемогущество мирового рынка электроники препятствует созданию систем, опирающихся на принципиально новые базовые элементы.

Базовые концепции системы "Сплав"

Система "Сплав" обеспечила оперативность космического фотографирования путём замены фотоплёнки на многокристальный приёмник (ПДИ) на базе матриц ПЗС с синхронным накоплением энергии движущихся изображений [1, 3], рис. 2, цифровой обработки и передачи сигналов изображений через геостационарный спутник-ретранслятор [2, 4]. Отсутствие прототипов проектируемой системы и её базового элемента повлекло за собой большую теоретическую и экспериментальную работу по обоснованию её работоспособности и по обеспечению требуемых характеристик.

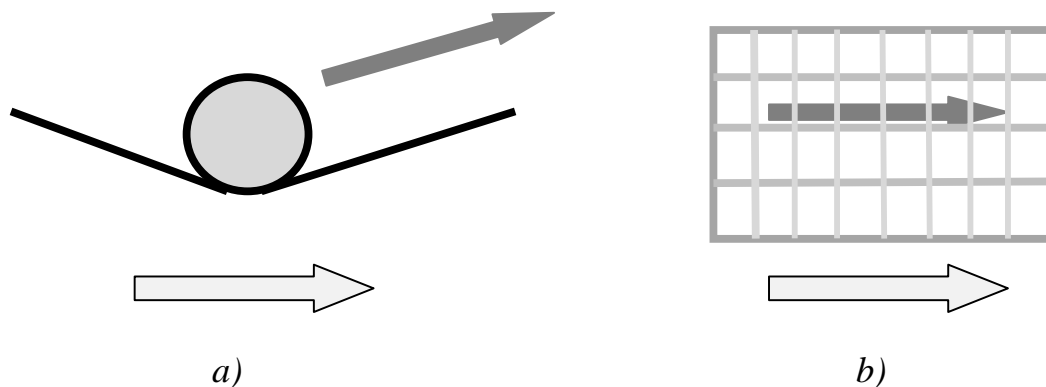


Рис. 2. Концепция замены фотоплёнки в КА "Янтарь-4КС1" [1, 4], движущейся со скоростью бега изображения в фокальной плоскости, на неподвижную матрицу ПЗС, вдоль столбцов которой бегут зарядовые пакеты со скоростью, равной скорости бега изображения [1, 8]. Скорость бега зарядов задаётся бортовой цифровой вычислительной машиной, БЦВМ "Салют-3М" [2, 4].

Концепция базовой технологии электронных систем

Базовая технология производства электронных систем – это такая технология, которая обеспечивает массовое производство разнообразной аппаратуры на унифицированной технологической основе, качество и надёжность которой должны быть подтверждены массовыми испытаниями тестовых изделий, что упрощает процесс контроля качества и надёжности.

Базовая технология НИИ микроприборов, возглавляемого генеральным директором Гуськовым Г.Я. [10], - это собственное производство гибридных

интегральных схем ВЧ и СВЧ диапазонов на базе бескорпусных изделий электронной техники.

К 1973 году НИИ Микроприборов Минэлектронпрома СССР под руководством генерального директора, героя социалистического труда, Гуськова Геннадия Яковлевича, завоевал высокий авторитет и накопил огромный опыт создания космической микроэлектронной аппаратуры:

- бортовые цифровые ЭВМ "Салют 3М", для космических аппаратов серий "Зенит" и "Янтарь" [4];
- радиоаппаратура "Сирена" для поиска спускаемых фотографических капсул;
- комплекс космической связи "Сургут" через спутники связи "Молния 1" [3];
- микроэлектронные комплексы телеметрии для различных КА.

Для создания перспективных космических электронных систем с уникальными характеристиками было обеспечено тесное взаимодействие разработчиков систем и комплектующих изделий. Создание системы "Сплав" опиралось на базовую технологию НИИ микроприборов.

Внедрение концепций системы "Сплав"

В 70-е годы автор руководил теоретическим и экспериментальным обоснованием выдвинутых идей, разработал методы расчёта параметров приёмника движущихся изображений (ПДИ) и цифровой линии ретрансляции специнформации, убедил руководство и специалистов Минобороны, Минобщемаша, Миноборонпрома, Минэлектронпрома в эффективности концепций системы "Сплав", готовил специалистов на кафедре МФТИ, руководил дипломниками МИЭТ и МФТИ, выдал задания на разработку комплектующих изделий, узлов, подсистем и систем,

Опора на закон Мура позволила заранее оценить перспективы роста характеристик компонентов.

Сопряжённая разработка [9] системы оперативного детального наблюдения "Сплав" и микроэлектронных комплектующих изделий позволила сократить сроки ввода системы в эксплуатацию, обеспечила базу для её быстрого совершенствования и стимулировала развитие микроэлектронных технологий.

Живучесть основных принципов системы "Сплав"

Заложенные автором в 1974 году принципы построения ПДИ - приёмника движущихся изображений системы наблюдения [1], актуальны до настоящего времени [4], и показывают быстрый рост количественных характеристик:

- За 40 лет число столбцов матрицы возросло от 108 до более 1000;
- Число строк накопления – от 32 до 128;
- Число спектральных полос – с 1 до 7.

Технические задания, выданные автором в 1974 году на три варианта матриц ПЗС с размерами пикселей: 30X39, 21X24 и 12X16 мкм, обеспечили своевременное начало ЛКИ системы "Сплав" в 1982 году, сдачу её в эксплуатацию с повышенным разрешением в 1986 году и технологический задел для дальнейшего совершенствования системы до современного размера пикселя в 5X5 мкм [4].

Освоение технологии ПЗС на новых материалах или гетероструктурах позволит ещё более расширить спектральный диапазон чувствительности ПДИ.

Система "Сплав" – школа кадров высшей квалификации для космического электронного аппаратостроения

Участие в разработке системы "Сплав" способствовало росту квалификации выдающихся специалистов, таких как:

Романов Алексей Александрович – Зам. Генерального директора по науке АО «Российские космические системы», д. т. н.

Бакланов Александр Иванович – Зам. Генерального директора РКЦ «Прогресс» и главный конструктор НПП «ОПТЭКС», к.т.н.

Казанцев Олег Юрьевич - генеральный директор НПО «Лептон», к.ф.м.н.

Главный урок системы "Сплав" - творческий поиск принципиально новых технических решений с опорой на талантливую молодёжь, что обеспечило подготовку высококвалифицированных специалистов на базе МФТИ и МИЭТ, успешно решающих задачи подготовки нового поколения специалистов [11, 12] для перспектив развития электронных космических систем.

Уроки создания системы "Сплав" помогут в реализации указания Путина Владимира Владимировича о разработке стратегии развития отечественной микроэлектроники.

3. Концепции развития космических систем оперативного наблюдения

Если не ставить временных рамок, то перспективы развития систем оперативного космического наблюдения безграничны [13, 14]. Я попытаюсь оценить предвидимые направления их совершенствования на ближайшие 5-10 лет.

Одна из перспектив развития оперативного космического наблюдения – лазерная космическая сеть глобальной ретрансляции гигабитных потоков данных, рис. 3.

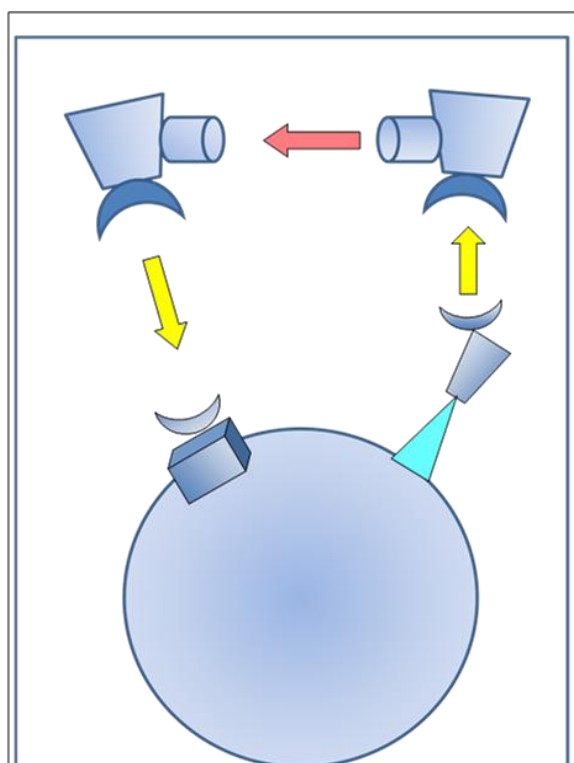


Рис. 3. Схема перспективной системы оперативного наблюдения поверхности Земли с передачей цифровой информации через околоземную сеть спутников лазерной связи. Жёлтые стрелки - радиолинии; красная стрела - лазерная линия связи.

Концепции развития систем оперативного наблюдения

- Облегчение и удешевление оптических систем и космических аппаратов оперативного детального наблюдения
- Продвижение технологии ПЗС в ближний и средний ИК диапазоны
- Освоение технологии сверхразрешения
- Создание глобальной лазерной сети ретрансляции цифровой гигабитной информации с КА на низких орбитах.

Облегчение оптической системы

Целесообразна замена тяжёлых линзовых объективов, доставшихся в наследство от съёмки на фотоплёнку, на зеркальные телескопы. Назрело облегчение и удешевление спутников-наблюдателей при сохранении их разрешающей способности путём замены линзового объектива на зеркальный телескоп. В отличие от телескопа КА "Аракс", с зеркалом диаметром 1,5 м, можно использовать для орбит высотой в 300 км телескоп с диаметром 0,5 м. Это приведёт к уменьшению массы главного зеркала в 27 раз! Дифракционный размер пятна на Земле будет 0,5 м при отсутствии хроматических aberrаций.

Допустимо искривление фокальной поверхности за счёт многокристальной конструкции ПДИ.

Оценка параметров облегчённого главного зеркала

Фокусное расстояние зеркала, м	3
Диаметр зеркала, м	0,5
Толщина зеркала, см	6
Материал	Ситалл СО115М, Лыткарино
Плотность, т /м ³	2,46
К облегчения зеркала	0,3
Масса, кг	менее 10

Облегчение конструкции оптических систем КА ДЗЗ поспособствует организации их массового производства, в том числе и для лазерной связи.

Концепция продвижения ПЗС с ВЗН в ИК диапазон

Зеркальный телескоп способен работать одновременно в видимом и ИК диапазонах. Освоение технологии матриц ПЗС ближнего и среднего ИК диапазонов откроет новое направление в дистанционном зондировании Земли. Освоение матриц дальнего ИК диапазона существенно повысит чувствительность ИК наблюдения в тёмное время суток.

Концепция сверхразрешения в ПДИ ИК диапазона

Желательно освоить спектральный диапазон чувствительности матриц в ближнем ИК на базе гетероструктур, аналогичных используемым в лазерах на диапазон длин волн 1,3 – 1,7 мкм. В матрицах ИК диапазона размер пикселя может оказаться большим. Но можно будет использовать несколько матриц со сдвигом на долю размера пикселя, рис. 4. При наземной обработке информации параллельные потоки сводятся в один более высокочастотный поток, обеспечивающий повышенное разрешение за счёт компенсации алиасинга [15].

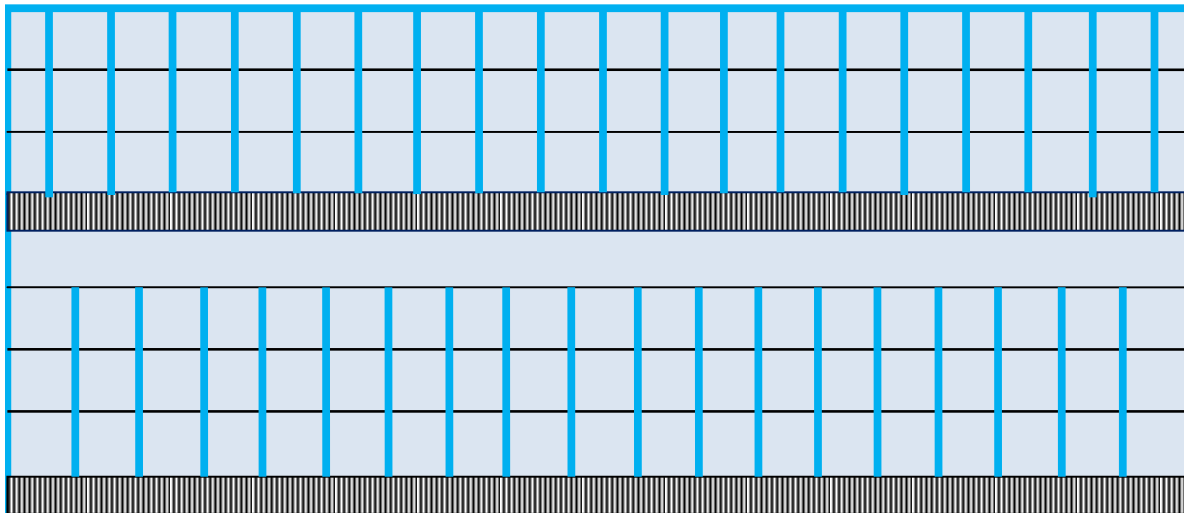


Рис. 4. Фрагмент матрицы ПЗС со сверхразрешением и компенсацией алиасинга [14] за счёт сдвига fotocувствительных структур матрицы ПЗС с ВЗН на долю пикселя по вертикали и горизонтали и цифровой обработки сигналов выходных регистров.

Базовые элементы перспективных электронных космических систем:

- Фотоприёмные матрицы ближнего ИК диапазона;
- Пары мощных эффективных и малошумящих транзисторов на новые диапазоны частот;
- Пары надёжных и эффективных лазеров и высокочувствительных фотоприёмников;
- Координаточувствительные ИС и устройства наведения луча лазера или оптической оси фотоприёмника;
- Высоконадёжные компьютеры и сетевые устройства для бортовых сетей и распределённых сетей роя спутников;
- Высокопроизводительные сигнальные процессоры и процессоры для систем искусственного интеллекта.

Концепция космической лазерной связи

Поставленная нами в 1974 году задача разработки системы дальней космической лазерной связи в составе трёх геостационарных спутников в то время казалась нереализуемой, но сегодня успешно решается в рамках European Data Relay System (EDRS) [16].

Прогресс в наращивании производительности магистральных волоконно-оптических линий связи, чья скорость передачи информации превышает 1000 Тбит/с, позволяет надеяться, что нашим специалистам удастся превзойти достигнутую европейцами скорость передачи в 1,8 Гбит/с за счёт снижения высоты орбиты лазерной сети спутников до 2000 км при снижении излучаемой лазерами мощности.

Глобальная сеть магистральных лазерных ретрансляторов позволит снизить время передачи информации с низко летящих КА оперативного наблюдения с часов до минут

Высота орбиты ретрансляторов около 2 тысяч км снизит задержку информации и мощность лазерных передатчиков, а также снизит требования к мощности радиопередатчиков низкоорбитальных КА.

Концепция лазерной сети, обслуживающей КА ДЗЗ

Оценка параметров лазерной линии связи

Дальность лазерной связи, L, км	10000
Диаметр зеркала, м	0,5
Мощность передатчика, Вт	0,1
Длина волны, мкм	1
Поток информации, I, Гбит/с	10
Коэффициент запаса по мощности	10
Отношение сигнала к квантовому шуму (S/N_q), dB	12,5
Произведение I L, Тбит /с км	100

Малая требуемая мощность лазерного передатчика позволит использовать волновое уплотнение каналов.

Концепция лазерных сетей, обслуживающих КА ДЗ Луны и планет

Околоземная лазерная спутниковая телекоммуникационная сеть сможет обеспечить связь со спутниками дистанционного зондирования Луны, рис. 5, и планет Солнечной системы. По мнению автора, приоритетом в освоении Луны и планет должно быть создание вокруг них сетей из автоматических спутников дистанционного зондирования, связанных с околоземной телекоммуникационной системой гигабитной лазерной связью. Малые размеры автоматических спутников дистанционного зондирования облегчат выведение их на орбиту вокруг исследуемой планеты. Накопление детальной информации о состоянии поверхности Луны и выбранных для дальнейшего исследования планет позволит лучше подготовить пилотируемые экспедиции и избежать возможных рисков.

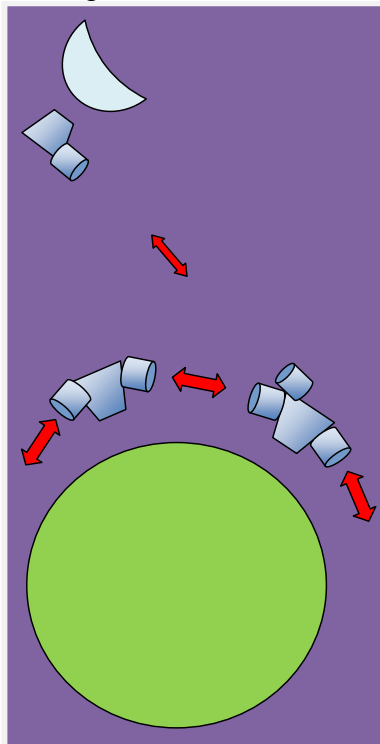


Рис. 5. Концепция передачи по лазерной линии связи цифровой информации от окололунной орбитальной сети автоматических спутников ДЗ на спутники-ретрансляторы околоземной магистральной сети лазерной связи.

Концепция 3D структуры из малых спутников

Объединение роя малых спутников в нежёстко связанную трёхмерную структуру позволит создать в Космосе огромную динамическую фазированную антенную решётку (ДФАР), рис. 6.

Для сборки конструкции можно будет использовать углепластиковые стержни, а для контроля взаимных координат спутников - матрицы ПЗС. Эта концепция наследует метод ЛОМО нежёсткого соединения вторичного зеркала с главным зеркалом КА "Аракс" с контролем взаимных положений зеркал с помощью матриц ПЗС.

Мгновенные точные координаты спутников поступают в вычислитель фаз ДФАР, обеспечивая точное наведение узкого радиолуча в пространстве.

Вариант 3D сборки ДФАР из малых спутников

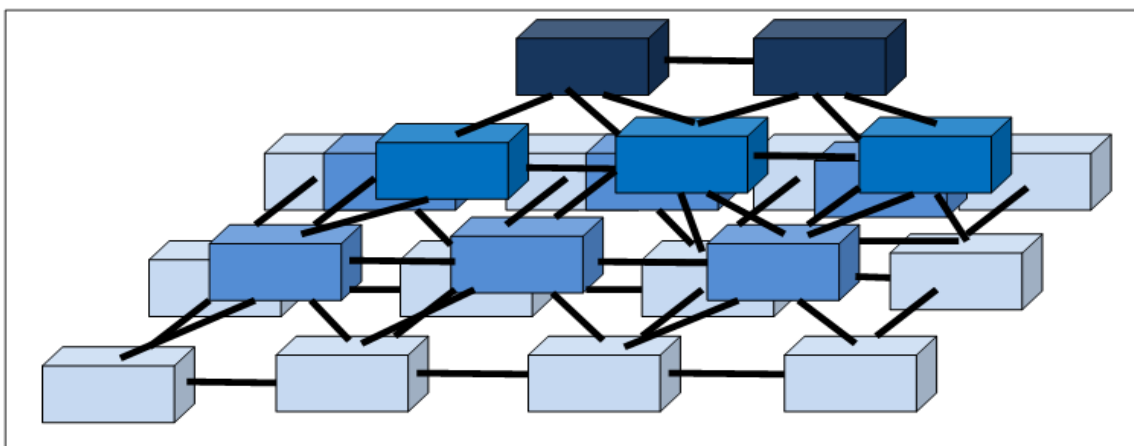


Рис. 6. Схема соединения малых спутников в трёхмерную структуру для создания динамической фазированной антенной решётки. Каждый слой обозначен своим цветом.

Концепция формирования нежёстко связанной структуры ДФАР

Малые КА выводятся группами, в которых уже сформированы механические и электрические связи;

После вывода групповая структура разворачивается в рабочее положение в соответствии со специализацией каждого КА;

Другие группы, выведенные другими носителями, соединяются с ранее сформированными группами с помощью малых КА – роботов, обеспечивающих механические и электрические связи;

Таким образом, связанная структура ДФАР растёт во времени и пространстве с прецизионным контролем взаимных положений малых КА.

Концепция динамической адаптивной оптики

В отличие от телескопа ЛОМО для КА «Аракс», где применена юстировка телескопа на орбите, предлагается динамическое точное отслеживание положений антенн с помощью координато-чувствительных ИС с передачей этой информации фазовращателям. Можно начать с метровых волн, продвигаясь к оптическому диапазону по мере совершенствования технологии контроля положений антенн или зеркал. Синтез апертуры допускает наличие больших разрывов между зонами ДФАР.

Возможные применения ДФАР

Радиометр для микроволновой радиометрии [17] атмосферы и ионосферы Земли, поверхности Земли, Луны и планет Солнечной системы;

Радиотелескоп с высоким угловым разрешением.

Основной принцип действия – компенсация гибкости конструкции за счёт точного учёта взаимных координат излучателей при вычислении фазовых сдвигов.

Заключение

Массовое производство унифицированных конструкций беспилотных космических аппаратов и их электронной аппаратуры на унифицированной технологической и элементной базе позволит создать новые глобальные системы дистанционного зондирования в видимом, ИК и радиодиапазонах.

Создание глобальной сети спутников гигабитной лазерной ретрансляции на орбитах средней высоты повысит оперативность доставки информации ДЗЗ.

Система космической лазерной связи также способна обеспечить передачу больших потоков цифровой информации от систем наблюдения поверхности Луны и планет Солнечной системы.

Динамическое фазирование антенных решёток из множества нежёстко связанных малых космических аппаратов позволит создать космические радиометры и радиотелескопы с повышенным угловым разрешением.

Для достижения высоких характеристик космических электронных систем ДЗЗ необходимы выбор и разработка уникальных базовых элементов.

Отработанные для космического применения узлы, блоки и базовые элементы можно будет использовать для создания беспилотной сельскохозяйственной техники и в иных отраслях.

Литература

1. Седунов Б.И. Принципы, заложенные в основу первой отечественной цифровой системы дистанционного зондирования Земли из Космоса и цифровых формирователей сигналов изображений для космических телескопов. В сб. Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн. Конспекты лекций // V Всероссийские Армандовские чтения: молод. школа. – Муром: МИ ВлГУ, 2015. с. 77.
2. Седунов Б.И. Цифровая революция в наблюдении поверхности Земли из Космоса. В сб. Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн. Конспекты лекций // VII Всероссийские Армандовские чтения: молод. школа. – Муром: МИ ВлГУ, 2017. С. 155. [Электронный ресурс]: <http://www.mivlgu.ru/conf/armand2017/lecture-2017/pdf/titul.pdf>.
3. Б.И. Седунов. "Микроэлектронная революция в наблюдении поверхности Земли из космоса". Книга "Ракетно-космическое Приборостроение и Информационные Технологии". Сборник трудов IX Всероссийской научно-технической конференции "Актуальные проблемы Ракетно-космического Приборостроения и Информационных Технологий" (5 - 7 июня 2018 г.) / Под ред. д.т.н. профессора Романова А.А. - М.: АО "Российские космические системы", 2018, стр. 191 - 202.
4. Кирилин А.Н., Аншаков Г.П., Ахметов Р.Н., Сторож Д.А. Космическое аппаратостроение: Научно-технические исследования и практические разработки АО «РКЦ Прогресс». Изд. 2 // АО «РКЦ Прогресс», Самара: 2017. 376 с.
5. Орбитальные станции «Алмаз» и «Салют» (ЦКБМ И ЦКБЭМ) . [Электронный ресурс]: <http://astronaut.ru/bookcase/books/afanasiev2/text/11.htm>

6. Алфёров Ж. И. Нобелевская лекция: "Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии". УФН, 2002, том 172, номер 9, стр. 1068–1086
7. Б.И. Седунов. Проектирование Сложной Электронной Системы на Новых Физических Принципах. Вестник РосНОУ «Сложные системы: модели, анализ, управление». № 4, 2018, стр. 108-118.
8. Гуськов Г.Я., Седунов Б.И., Петручук И.И., Возьмилов П.Н. Фотоприемник движущегося изображения. // Патент SU 587637.
9. Гуськов Г.Я., Седунов Б.И. Конструирование сложной микронной аппаратуры. // Электронная промышленность. 1977, выпуск 6 (60), с. 28-36.
10. Гуськов Геннадий Яковлевич. Герой социалистического труда. [Электронный ресурс]: http://www.warheroes.ru/hero/hero.asp?Hero_id=16252
11. Романов А.А. Системная разработка космической техники: учебное пособие: в 2 ч. / М. МФТИ, 2015, 238 с.
12. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга: учебное пособие. М. Бином. Лаборатория знаний, 2009. - 234 с.
13. Бакланов А. И. Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения земли высокого разрешения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы; (часть I), 2018, т. 5, вып. 3. С. 17–28.
14. Бакланов А. И. Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения земли высокого разрешения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы; (часть II), 2018, т. 5, вып. 4. С. 14–27.
15. Б.И. Седунов. Моделирование алиасинга в ПЗС-формирователе сигналов изображений. Вестник РосНОУ «Сложные системы: модели, анализ, управление». № 3, 2017, стр. 17-23.
16. EDRS (European Data Relay Satellite) Constellation / SpaceDataHighway. [Электронный ресурс]: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/e/edrs>.
17. Кутуза Б.Г., Данилычев М. В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности // URSS, 2016, 336 с.