

ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2009 Н.Н. Севастьянов¹, В.Н. Бранец¹, В.А. Панченко¹, Н.В. Казинский¹
Т.В. Кондранин², С.С. Негодяев²

¹ ОАО «Газпром космические системы», Королёв Московской обл.,

Тел.: 8 (495) 504-29-03; e-mail: panchenko@gazprom-spacesystems.ru

² Московский Физико-технический институт

Описываются мировые тенденции космической промышленности, направленные на создание малых космических аппаратов. Рассматриваются вопросы создания малых КА дистанционного зондирования Земли, позволяющих реализовать требования, предъявляемые к космическим аппаратам оптико-электронного наблюдения с высоким пространственным разрешением. Приведен краткий анализ зарубежных систем оптико-электронного наблюдения высокого разрешения, применяемых на малых космических аппаратах и сформулированы рекомендации по основным проектным решениям при создании таких систем. Приведены общие требования к параметрам системы управления движением и навигацией малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли высокого разрешения, такие как наведение, стабилизация и др. Проведен синтез приборного состава системы управления и рассмотрены примеры современной отечественной реализации приборов предназначенных для выполнения съемочных операций. Сформулированы основные требования к программно-алгоритмическому обеспечению работ системы управления движением и навигацией.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных тенденций развития космической техники является создание малых космических аппаратов (МКА).

Первые МКА появились как опытные образцы университетских разработок, используемые либо как средство приобретения опыта в создании и эксплуатации космической техники, либо как инструмент для отработки новых инженерных и технологических решений. Однако, уже в конце прошлого и начале этого столетия, благодаря новейшим достижениям в электронике и других областях науки и техники, приведшим к возможности миниатюризации практически всех служебных систем КА без ущерба для их функциональных качеств, появилась возможность использовать малые космические аппараты для решения достаточно сложных научных и прикладных задач. При этом, относительно небольшая стоимость создания отдельного МКА вместе с возможностью организации группового запуска нескольких таких аппаратов позволяет значительно снизить стоимость реализации различных космических проектов.

Кроме того, стало возможным, находясь в рамках ограниченного финансирования, создать и вывести на орбиту вместо одного большого (тяжелого) КА группировку малых космических аппаратов, предназначенных на решения общей задачи. Использование таких группировок позволяет сделать скачок в качестве услуг, предоставляемых на основе использования космических средств, прежде всего, значительно повышая их оперативность.

1. ПРИМЕНЕНИЕ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ДЗЗ

Прежде чем рассмотреть применение МКА в качестве КА ДЗЗ необходимо «договориться о терминологии». В различных источниках КА классифицируются по массово-габаритным параметрам в достаточно широком спектре.

В настоящей статье предлагается классификация немецкой компании DLR. На рисунке 1 представлена условная классификация космических аппаратов, а также ориентировочные зависимости стоимости и сроков создания КА ДЗЗ от их массы.

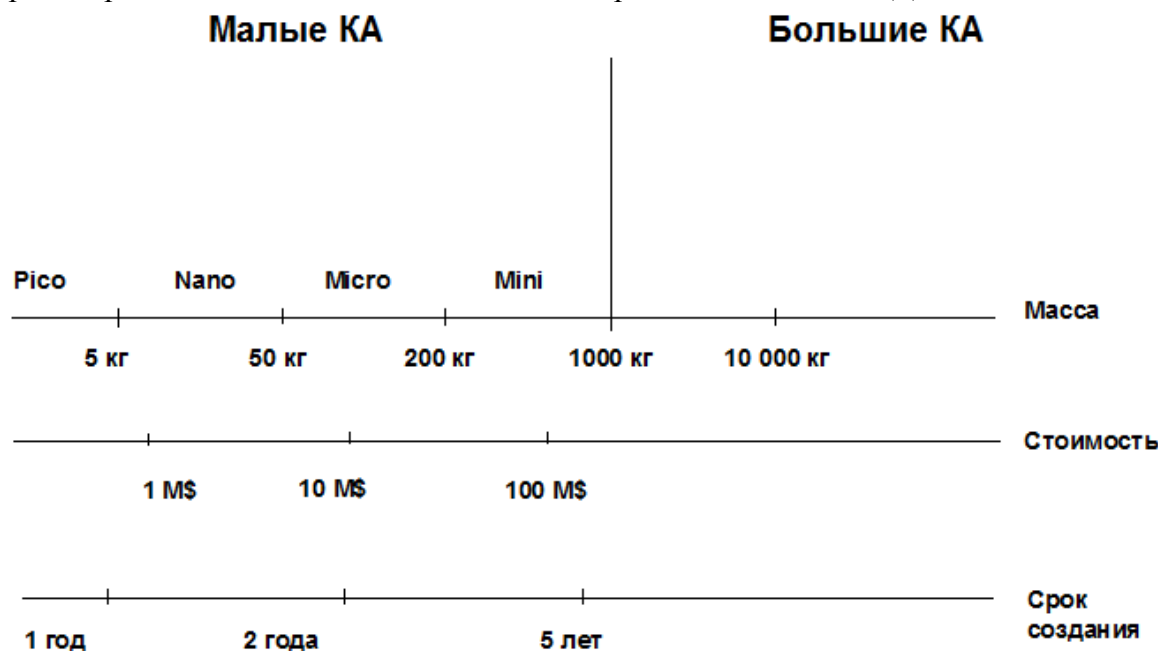


Рисунок 1 – Классификация КА по массе с ориентировочной зависимостью сроков их создания и стоимости от массы (по материалам DLR).

Из рисунка 1 видно, что и стоимость и время создания растут с ростом массы КА. Кроме того, с ростом массы увеличивается стоимость запуска КА. Как следствие, с увеличением массы КА растет стоимость реализации проекта с его участием, причем этот рост заметно превышает линейный.

Значительное уменьшение затрат на создание и ввод в эксплуатацию МКА, а также сокращение времени на их производство и наземные испытания позволяет сформулировать ответ на вопрос, какие преимущества дает использование малых космических аппаратов:

- значительное увеличение оперативности получения данных наблюдения за счет создания необходимой по численности группировки малых аппаратов;
- более быстрое внедрение новых технических разработок и технологий съемки;
- увеличение «надежности» группировки за счет ее быстрого восполнения в случае необходимости.

Кроме того, относительно малая стоимость МКА позволяет привлекать для их создания предприятия малого бизнеса и высшие технические учебные заведения, т.е. способствует созданию «пограничной зоны» разработка/образование.

Внедрение «технологии» малых космических аппаратов поддерживается сегодня современными тенденциями развития науки и техники, такими как миниатюризация электроники, переход к цифровым технологиям в управлении, прогресс в создании конструктивных материалов и целом ряде других технических решений. Появление на рынке малых носителей, являющихся модификацией военной ракетной техники, также способствует расширению возможностей использования МКА.

Хотелось бы также отметить, что появление МКА ДЗЗ имеет политические последствия, поскольку позволяет сравнительно небогатым странам обрести «независимость» в космосе – создавать собственные спутники ДЗЗ, которые могут быть использованы в целях обеспечения безопасности страны без оглядки на «мнение» основных космических держав.

КА ДЗЗ (или группировку КА ДЗЗ) можно охарактеризовать несколькими основными «потребительскими» характеристиками:

- пространственное разрешение;
- оперативность;
- количество используемых спектральных каналов;
- производительность.

На рисунках 2 и 3 представлены зависимости оперативности, пространственного разрешения и количества спектральных каналов, необходимых для решения различных задач.

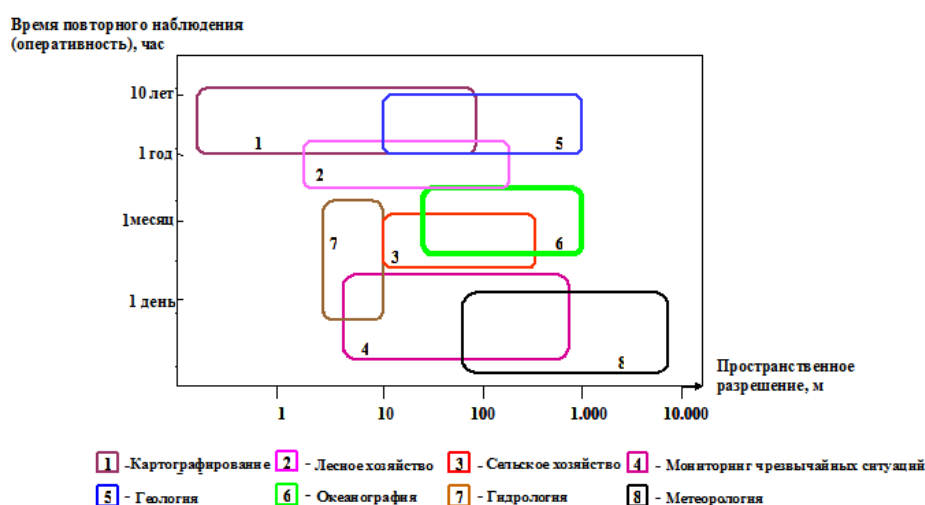


Рисунок 2 – Пространственное разрешение и время повторного наблюдения (оперативность), необходимые для решения различных задач.

Как уже отмечалось выше, группировки МКА имеют неоспоримое преимущество перед одиночными большими КА в оперативности.

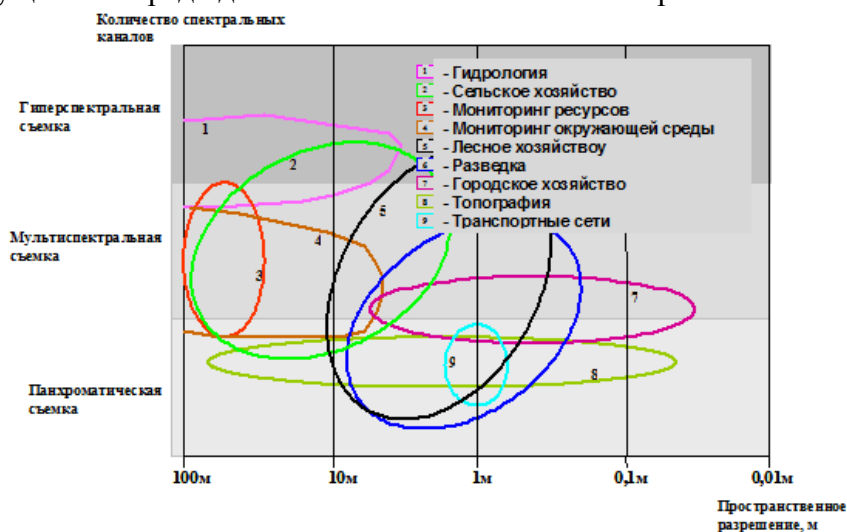


Рисунок 3 – Пространственное разрешение и количество спектральных каналов, необходимые для решения отдельных отраслевых задач.

Пространственное разрешение и производительность (возможности по съемкам разного типа) КА ДЗЗ зависят в основном от двух систем МКА:

- целевой аппаратуры (системы оптико-электронного наблюдения);
- системы управления движением (ориентацией).

Современные научные и технологические тенденции в создании данных систем позволяют совершить качественный скачок в создании космических аппаратов оптико-электронного наблюдения с высоким пространственным разрешением. В качестве примера можно привести экспериментальный малый (micro) КА – TopSAT с разрешением 2,5 м и массой 112 кг и промышленный малый (mini) КА – EROS-B, с разрешением 0,7 м, а массой 300 кг.

Экспериментальный КА TopSAT был запущен в 2005 г, а промышленный КА EROS-B был введен в коммерческую эксплуатацию уже в 2006 г.

За последние два года тенденция космической промышленности к созданию малых КА, обладающих при этом полными функциональными возможностями, еще более усилилась, в настоящее время запущены или подготовлены к запуску такие МКА, как Beijing-1, Nigeriasat-2, Alsat-2, Tacsat-2 и др. Особо хотелось бы выделить государственную программу США по созданию быстро разворачиваемых группировок малых КА Tacsat (Tactical satellite).

Представляется несомненным, что тенденция к миниатюризации отдельных КА и росту орбитальных группировок сохранится и в дальнейшем.

В предлагаемой статье предлагается более подробно остановиться на реализации двух систем МКА оптико-электронного наблюдения – целевой аппаратуры (ЦА) и системы управления движением и навигацией (СУДН). Обе эти системы оказывают самое существенное влияние на качество получаемого изображения, при этом если ЦА формирует само изображение, то СУДН обеспечивает условия для этого процесса. Кроме того, возможности средств СУДН обеспечивают угловую маневренность космического аппарата, которая проявляется в таких «потребительских» характеристиках, как производительность и способность к реализации различных режимов съемок (стереосъемка, площадная съемка и т.д.).

2. СИСТЕМЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ МКА

При описании целевой аппаратуры (ЦА) оптико-электронного наблюдения можно провести ее условное деление на две части – объектив и фотоприемное устройство. Технологии для каждой из частей различны и технологические скачки происходят относительно независимо.

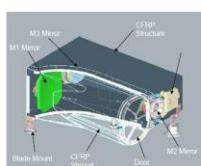
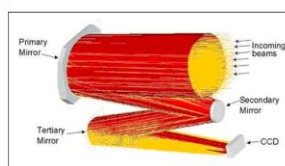
Так в качестве первых фотоприемных устройств – использовали пленки и фоточувствительные пластины (от названия пленки «панхром» пошло в дальнейшем название спектрального диапазона и для других типов фотоприемников). В настоящее время есть довольно большая номенклатура типов фотоприемников – матрицы и линейки различной размерности и типов – ПЗС, КМОП и их модификации.

Объективы, применяемые для ЦА, особенно высокого разрешения, так же претерпели ряд изменений. Улучшение технических характеристик объективов связано в первую очередь с развитием конструкционных (композитные материалы и др.) и оптических материалов (ситалл, zerodur и др.), а так же конструктивных решений, позволяющих применять «продвинутые» оптические схемы. Необходимо отметить, что еще 10 лет назад оптические схемы типа «Корша», для объективов с большой апертурой практически не применялись ввиду их сложности, а сейчас сложные, но компактные и легкие оптические схемы стали скорее правилом, особенно в ЦА для малых КА. Ниже представлены описания некоторых ЦА малых КА.

Topsat (112 кг)

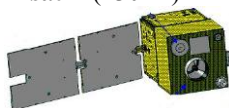


Оптическая схема и внешний вид ЦА

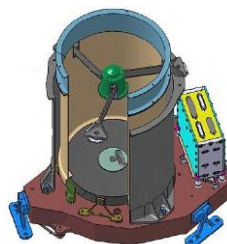


| | |
|-----------------------------|--------------------------------|
| Разработчик | Rutherford Appleton Laboratory |
| Оптическая схема | внеосевая |
| Пространственное разрешение | 2,5 м |
| Полоса захвата | 15 км |
| Масса ЦА | 32 кг |
| Энергопотребление | 30 Вт |

Alsat-2 (130 кг)



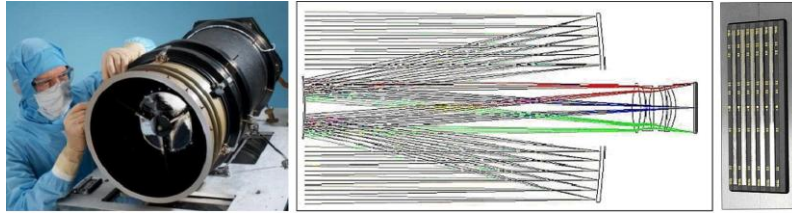
Внешний вид ЦА



| | |
|-----------------------------|--------------|
| Разработчик | EADS Astrium |
| Оптическая схема | Корша |
| Пространственное разрешение | 2,5 м |
| Полоса захвата | 17,5 км |
| Масса ЦА | 18,5 кг |

Beijing-1 (168 кг)

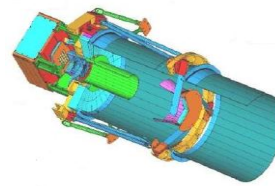
Оптическая схема и внешний вид ЦА



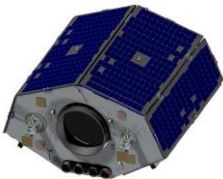
| | |
|-----------------------------|--------------|
| Разработчик | SSTL |
| Оптическая схема | Dall-Kirkham |
| Пространственное разрешение | 4 м |
| Полоса захвата | 24 км |
| Масса ЦА | 25 кг |
| Энергопотребление | 12 Вт |

Razaksat-1 (180 кг)

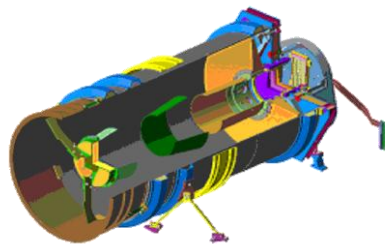
Внешний вид ЦА



| | |
|-----------------------------|---------------|
| Разработчик | н/д |
| Оптическая схема | Ричи-Кретьена |
| Пространственное разрешение | 2,5 м |
| Полоса захвата | 20 км |
| Масса ЦА | 42 кг |
| Энергопотребление | 63 Вт |

Nigeriasat-2 (300 кг)

Внешний вид ЦА



| | |
|-----------------------------|--------------|
| Разработчик | SSTL |
| Оптическая схема | Dall-Kirkham |
| Пространственное разрешение | 2,5 м |
| Полоса захвата | 20 км |
| Масса ЦА | 42 кг |
| Энергопотребление | 55 Вт |

EROS-B (300 кг)

Внешний вид ЦА и его составных частей



| | |
|-----------------------------|----------|
| Разработчик | ELOP ltd |
| Оптическая схема | н/д |
| Пространственное разрешение | 0,7 м |
| Полоса захвата | 7 км |
| Масса ЦА | н/д |

Анализируя международный и отечественный опыт создания систем оптико-электронного наблюдения для малых космических аппаратов, можно выделить несколько ключевых технологий, позволяющих минимизировать массово-габаритные характеристики ЦА высокого разрешения:

- современные компактные оптические схемы (схема Корша, внеосевые схемы, схемы с асферическими элементами и др.);
- высокоэффективные конструкционные материалы (карбид кремния, углепластики, инвар и др.);
- современные материалы для оптических элементов (ситалл, zerodur, современные сорта оптических стекол);
- высокоскоростные ПЗС фотоприемники с временной задержкой с накоплением (ВЗН);
- фотоприемники большой размерности с малым размером элемента дискретизации (пикселя), но высокой чувствительностью.

3. ТРЕБВАНИЯ МКА ДЗЗ К СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И НАВИГАЦИЕЙ

Обеспечение функций целевой аппаратуры ставит достаточно серьезные требования к системе ориентации и навигации МКА.

В первую очередь это касается наведения и стабилизации осей ЦА на объект съемки. Требуемая точность наведения составляет 2-5 угловых минут, а погрешность стабилизации осей относительно расчетных, в зависимости от пространственного разрешения должна быть не хуже $10^{-3} - 10^{-4}$ град/сек.

Так же важным фактором является маневренность аппарата и возможности формировать векторные маршруты произвольного направления относительно трассы полета. Современный КА ДЗЗ предполагает несколько видов съемки: кадровую съемку, съемку площадей, маршрутную и стереоскопическую съемку различных объектов (рисунок 4).

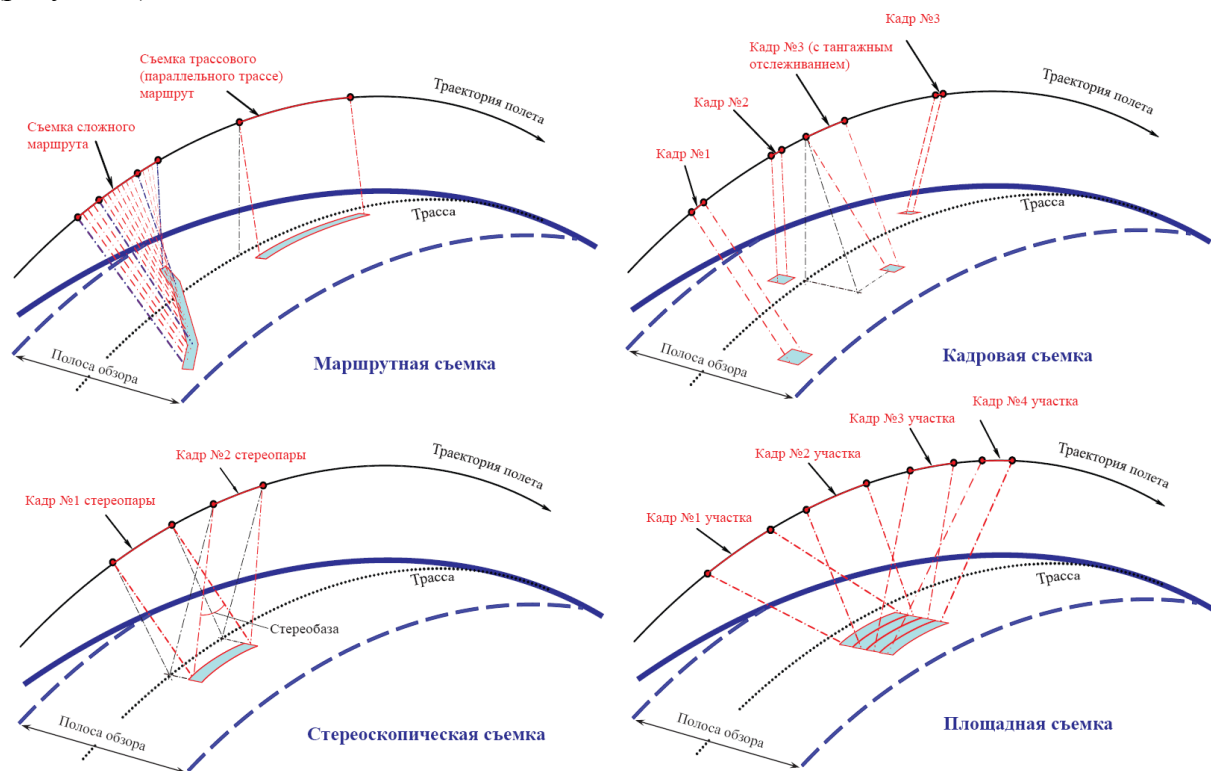


Рисунок 4 – Режимы съемки КА ДЗЗ оптико-электронного наблюдения.

Кроме того, современная информация ДЗЗ должна иметь высокую пространственную точность (привязку изображений к земной системе координат, например WGS-84), требования к которой зависят от пространственного разрешения и для разрешения не хуже 1 м составляют от 10 до 30 м.

На рисунке 5 представлены времена перенацеливания современных КА ДЗЗ.

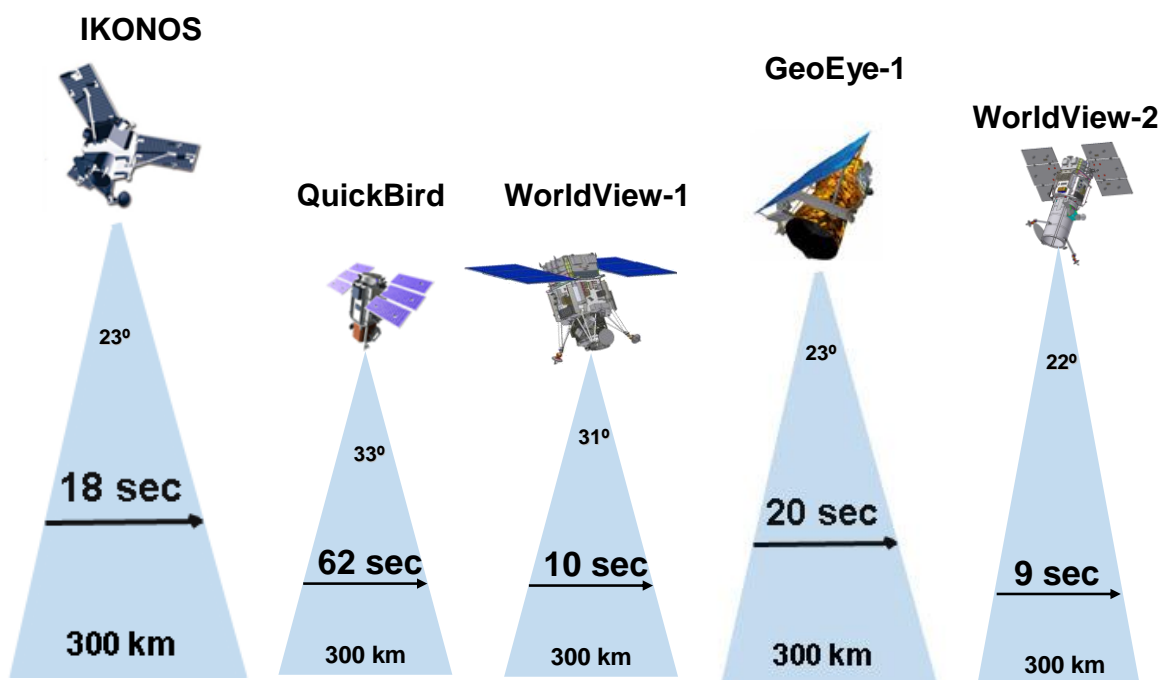


Рисунок 5 - Времена перенацеливания современных КА ДЗЗ в пределах единой полосы обзора 300 км.

Для достижения высокого пространственного разрешения в условиях минимизации габаритно-весовых характеристик целевой аппаратуры в современных МКА применяются различные технологии съемки:

- съемка с временной задержкой накопления (IKONOS, EROS-B);
- съемка с замедлением бега изображения (EROS-A).

Применение этих технологий хотя и позволяет значительно улучшить качество изображений, однако накладывает на систему управление движением и навигации существенные дополнительные требования.

Так, например, использование в фотоприемной матрице N шагов накопления позволяет увеличить отношение сигнал/шум в получаемом изображении в $N^{1/2}$ раз, повышая при этом требование к стабилизации в N раз. Учитывая, что обычно используемые значения N достигают 100 и более, получаем существенное ужесточение требований к СУДН.

4. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И НАВИГАЦИЕЙ

Анализ требований СУДН показывает, что процесс ориентации должен состоять из операций быстрых разворотов (смены ориентиров), переходящих непрерывно к точному программному наведению, в котором происходит регулирование углов и угловых скоростей вращения МКА. Построение системы управления движением, навигации и ориентации МКА возможно только с использованием современных технических решений. К таким решениям в первую очередь следует отнести:

- высокоточные и высокоскоростные звездные датчики, обеспечивающие знание ориентации КА;
- высокопроизводительные маховики, с системой измерений угловой скорости вращения маховика, обеспечивающие как быстрый разворот, так и высокий уровень стабилизации;
- аппаратура спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS, обеспечивающая синхронизацию времен и высокоточное измерение реального положения КА.

В предлагаемой статье основное внимание уделяется приборам, предназначенным для обеспечения эффективного функционирования ЦА МКА.

В качестве примера современного звездного датчика отечественного производства приведем параметры прибора БОКЗ-МФ (рисунок 5) разработки ИКИ РАН.



Рисунок 6 – Звездный датчик БОКЗ-МФ, разработки ИКИ РАН.

Звездный датчик БОКЗ-МФ предназначен для определения кватерниона ориентации приборной системы координат в инерциальной системе координат. Определение параметров ориентации осуществляется путем съемки участка звездного неба и обработки видеоизображения в процессоре прибора. В качестве приемника излучения в приборе используется неохлаждаемая ПЗС-матрица Kodak форматом 512x512 элементов. Объектив прибора имеет фокусное расстояние 32 мм и апертуру 18 мм. Поле зрения прибора имеет угловой размер 16 град. Масса прибора составляет 1,3 кг. Энергопотребление при нормальной температуре 9 Вт. Габариты прибора составляют 160x160x300 мм. Погрешность (с.к.о) определения направления оптической оси прибора составляет 5 угл.с, а погрешность (с.к.о) определения угла разворота вокруг оптической оси составляет 25 угл. с. Диапазон рабочих угловых скоростей составляет до 1,5 град/с, а частота обновления параметров ориентации 1 Гц. В связи с недостаточной скоростью выдачи кватерниона ориентации для задач ДЗЗ с высоким

разрешением (для обеспечения требуемой привязки необходимо 5-10 Гц) требует использования алгоритмов динамической фильтрации.

Для точной безрасходной стабилизации и программных разворотов необходимо использование управляющих двигателей-маховиков. В качестве примера в предлагаемой статье рассматриваются двигатели-маховики ДМ1-20 (рисунок 6), разработки ВНИИЭМ.



Рисунок 7 – Двигатель-маховик ДМ1-20, разработки ВНИИЭМ.

Технические характеристики ДМ1-20 приведены ниже.

| | |
|---|------------------------|
| Диапазон изменения кинетического момента, Нмс | ±1,0 |
| Максимальный управляющий момент, мНм | 20 |
| Диапазон изменения частоты вращения, об/мин | ±6000 |
| Момент инерции ротора J, кг м ² | 0,195·10 ⁻² |
| Количество импульсов на обороте (сигнал скорости ротора) | 36 |
| Мощность, потребляемая при нулевых управляющих и кинетических моментах, Вт, не более | 1,0 |
| Мощность, потребляемая при максимальном управляющем и номинальном кинетическом моментах, Вт, не более | 20 |
| Напряжение питания, В | 24 ... 34 |
| Габаритные размеры, мм | Ø150x100 |
| Масса, не более, кг, | 1,5 |
| Диапазон рабочих температур, °С | -10 ... +50. |

Для синхронизации измерений и съемок, построения ориентации, вычисления программного наведения, автономного планирования сеансов съемки и определения навигации является обязательным использование автономной спутниковой системы навигации

В качестве примера аппаратуры спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS приведем данные приемо-вычислительного модуля МПВ 2К-363-62 разработки «Российского Института Радионавигации и Времени» (РИРВ). МПВ 2К-363-62 обеспечивает обработку сигналов стандартной точности навигационных космических аппаратов (НКА) спутниковых радионавигационных систем (СРНС) ГЛОНАСС и GPS в диапазонах частот L1 и L2 и сигналов стандартной точности геостационарных спутников дополняющих широкозонных дифференциальных подсистем типа SBAS в частотном диапазоне L1. Число одновременно обрабатываемых сигналов (число приемоизмерительных каналов ПИК) – 36, распределенных следующим образом: 18 ПИК – обработка НКА СРНС GPS (в двух частотных диапазонах) и КА подсистем типа SBAS, 18 ПИК – обработка сигналов НКА СРНС ГЛОНАСС в двух частотных диапазонах. МПВ выполняет:

- автоматическое определение радионавигационных параметров фазового центра внешней приемной антенны (псевдодальности, приращения псевдодальности и фазы) по каждому рабочему НКА и выдачу их и информации альманаха и

эфмерид НКА по каналу №1 последовательного интерфейса RS-232 в форматах Binary, IEC 61162, RINEX;

- автоматическое определение текущих значений навигационных параметров фазового центра внешней приемной антенны (координат и высоты, составляющих вектора скорости движения относительно Земли), и точного значения текущего времени и выдача их по каналу №1 последовательного обмена интерфейса RS-232 в форматах Binary, IEC 61162, RINEX и AT-GSM, а также по каналу №2 в формате IEC 61162-1;

Габаритные размеры МПВ 80x55x12,5 мм, вес 75 г, потребление < 1 Вт.

Кроме перечисленных приборов, в состав СУДН для обеспечения других режимов МКА входят:

- малогабаритные датчики Солнца,
- MEMS измерители угловой скорости,
- магнитометры и магнитные привода (МП) для разгрузки накапливаемого кинетического момента МКА.

Вычислительные мощности для реализации задач ориентации и управления предоставляет интегрированный бортовой комплекс управления (БКУ) на базе цифровой платформы разработки НИИ «Аргон», осуществляющий наряду с этим управление всеми бортовыми системами МКА и осуществляющий информационную связь с наземным комплексом управления (НКУ).

Структура функционального программного обеспечения системы управления движением и навигации содержит три уровня:

- верхний уровень – режимов СУДН, к которым относится, в первую очередь, основной режим обеспечения штатного функционирования целевой аппаратуры (ЦА). Этот уровень кроме того содержит также ряд служебных режимов поддержания существования МКА, таких как дежурный режим, где осуществляется подзарядка аккумуляторных батарей МКА и разгрузка накопленного кинетического момента с помощью МП, режимы начального участка полета и, наконец, режим маневра для поддержания требуемой высоты полета МКА;
- средний уровень – расчетно-вычислительный, определяющий все параметры движения и ориентации МКА на основе первичной информации от датчиков и приборов СУДН (кинематический контур управления), формирующий управляющую информацию для исполнительных органов УДМ, МП, реактивных двигателей (динамический контур). К этому уровню относятся и задачи навигационного контура, в том числе задачи автономного планирования сеансов съемки наземных объектов, рассчитываемых на основании данных НКУ по координатам снимаемых объектов и текущей орбиты МКА. На этом же уровне выполняется более точное определение угловой скорости вращения МКА, необходимой задач точной стабилизации, получаемой методами динамической фильтрации уравнений вращательного движения аппарата;
- нижний уровень – управления приборами и исполнительными органами СУДН, прием и выдачу информации для задач управления.

Ко всем программным модулям функционального программного обеспечения предъявляются требования стандартных этапов разработки и верификации, встроенных интеллектуальных свойств FDIR (fault detection, isolation and recovery), обеспечивающих надежность функционирования МКА и его бортовых систем.

Заключение.

Летом 2008 года ФАКИ МФТИ провел «космическую школу» по проектированию малого космического аппарата наблюдения Земли на основе инновационных технологий. Участниками школы были студенты старших и средних (3 и 4 курсы), прошедшие конкурсный отбор и проявившие настойчивое желание участвовать в сложных технических разработках. В результате работы школы в конце 2008 года были выпущены технические предложения по малому космическому аппарату дистанционного зондирования Земли. Основной вывод технических предложений заключается в том, что сегодня можно создать современный КА ДЗЗ весом в 150 кг, включая вес полезной нагрузки – оптической аппаратуры высокого разрешения и высокоскоростной радиолинии передачи информации (45 кг) – все на основе отечественных российских разработок.