

**Олейник Александр Георгиевич**

**МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОГО СИНТЕЗА  
ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ  
УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ**

Специальность 05.13.01 - «Системный анализ, управление и обработка  
информации»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2002

Работа выполнена в Московском государственном университете леса

Научный руководитель доктор технических наук, профессор

Иванов Н.М.

Научный консультант кандидат технических наук

Цветков А.Б.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Чуркин А.В.

кандидат технических наук, с.н.с.

Стажков В.М.

Ведущая организация ФГУП «НИЦ им. Г.Н. Бабакина»

Защита состоится 14 июня 2002 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д212.146.04 Московского государственного университета леса по адресу: 141005, Мытищи-5, Московская обл., 1-я Институтская ул., д.1, МГУЛ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета леса

Автореферат разослан 13 мая 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент

Тарасенко П.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В данной работе представлены результаты исследования применения технологии компьютерного синтеза изображений (КСИ) для управления полетом космических аппаратов. На примере спутника дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) «Океан-О» продемонстрированы возможности использования технологии КСИ для решения задач управления полетом спутника в нештатной ситуации.

### Актуальность темы.

Компьютерный синтез изображений (т.н. «Технология виртуальной реальности» - ТВР) является одним из перспективных направлений использования современных информационных технологий для решения задач поддержки всех этапов жизненного цикла сложных технических систем. Эффективность применения ТВР обеспечивается кумулятивным представлением широкого спектра аналитической и справочной информации об объекте через создание его виртуального компьютерного «двойника», наделенного внешним видом, динамическими и другими свойствами реального объекта, формализованными в виде комплекса соответствующих математических моделей.

Использование ТВР для отображения информации в интуитивно понятном виде радикально повышает качество восприятия информации по сравнению с традиционными способами представления информации об объектах и процессах в виде таблиц и графиков. Улучшение качества восприятия информации повышает эффективность ее использования в целях принятия управленческих решений.

В настоящее время наиболее передовой уровень исследований по применению ТВР в космонавтике достигнут в США, где работы в этой области являются одним из приоритетов NASA. При этом разрабатываемая с использованием ТВР среда интеллектуального синтеза ISE (Intelligent Synthesis Environment) по мнению специалистов должна привести революционные изменения в процесс творческой работы ученых и инженеров.

Анализ опыта внедрения ТВР в мировой космонавтике позволяет выделить следующие актуальные направления ее применения и развития:

1. Создание систем, обеспечивающих в режиме реального времени визуальный контроль текущего состояния КС и оперативное принятие управленческих решений, в том числе при возникновении нештатных ситуаций.
2. Использование анимационных моделей космических систем в качестве объектов экспертных исследований, а также в целях информирования общественности и рекламы космических программ и проектов.

3. Использование ТВР для решения ряда специальных задач, например, при сканировании земной поверхности спутником ДЗЗ для контроля наведения аппаратуры наблюдения на центр участков сканирования в режиме покадровой съемки в реальном времени.
4. Совершенствование технологии информационной поддержки всех этапов жизненного цикла космических систем (проектирования, изготовления, эксплуатации, утилизации - т.н. CALS-технологии), обеспечивающей повышение надежности КС, сокращение стоимости и сроков их разработки через объединение территориально распределенных групп специалистов в рамках единой информационной среды.
5. Разработка нового поколения «дружественных» и информативных интерфейсов для обработки и анализа данных телеметрии, объем которых стремительно возрастает в связи с усложнением космических систем (МКС, «Созвездия» спутниковых группировок).

До недавнего времени ТВР весьма ограничено использовалась в практике космической деятельности из-за высокой стоимости графических аппаратно-программных комплексов. Высокие темпы роста производительности персональных компьютеров (ПК), а также постоянное совершенствование недорогих аппаратных ускорителей трехмерной графики в качестве стандартного компонента ПК, радикально увеличивают число потенциальных пользователей и областей применения ТВР. Развитие аппаратных графических ускорителей в свою очередь требует создания специальных алгоритмов генерации реалистичных изображений и разработки нового поколения интерфейсов, основанных на использовании трехмерной графики. Таким образом, исследования по теме диссертации являются актуальными не только в научно-техническом, но и в экономическом аспекте, так как нацелены на повышение эффективности использования современной вычислительной техники.

Практическая потребность в специальном изучении вопросов использования новых современных технологий визуализации для управления полетом КА возникла в конце 1997 года, когда было принято решение о затоплении ОПК «Мир». В рамках программы исследования различных стратегий сведения с орбиты и затопления ОПК «Мир» была поставлена задача реалистичного отображения планируемых событий для повышения наглядности, эффективности и надежности управления полетом.

Особую актуальность работы по исследованию применения ТВР для задач управления полетом КА приобрели несколько позднее, в 1999 году, в связи с возникновением нештатной ситуации на КА ДЗЗ «Океан-О», вызванной ошибкой в монтаже системы управления бортовым аппаратным комплексом (СУБАК). При этом ТВР оказалась востребованной для

анализа характера движения спутника в нештатном режиме управления, а также для анализа возможностей управления полетом КА нестандартным способом - с помощью солнечной батареи (СБ), используемой в качестве «аэродинамического паруса», при одновременном решении целевой задачи использования СБ для поддержания положительного энергобаланса КА.

Из-за отсутствия в силу ряда причин математических моделей и моделирующих стендов системы управления КА «Океан-О» положение СБ, обеспечивающее рабочую ориентацию КА, подбиралось опытным путем. Это приводило к необходимости частого проведения незапланированных сеансов связи, что в свою очередь повышало общие финансовые затраты и требовало дополнительных людских ресурсов.

Для повышения эффективности управления КА «Океан-О» с помощью СБ в части оперативного принятия обоснованных управленческих решений, а также сокращения количества сеансов связи и соответственно затрат на их проведение, было предложено использовать ТВР.

#### Цель диссертационной работы

Разработка и внедрение технологии компьютерного синтеза изображений для повышения эффективности управления полетом КА.

#### Автор выносит на защиту

- Математическую модель, алгоритм и программу, реализующие компьютерную визуализацию результатов расчетов движения КА относительно центра масс.
- Рекомендации по использованию технологии компьютерного синтеза изображений для решения различных задач космонавтики.
- Программу, реализующую модель движения КА относительно центра масс и исследование с ее помощью различных режимов движения КА «Океан-О».
- Результаты анализа движения и алгоритм управления КА «Океан-О» с использованием ТВР.

#### Научная новизна определяется следующим:

- Проведен анализ применимости различных алгоритмов компьютерного синтеза изображений для решения задачи визуализации модельных исследований в области динамики движения КА. В результате анализа показана эффективность применения технологии компьютерного синтеза изображений для решения задач управления движением КА. Сформулированы критерии выбора алгоритмов генерации

изображений применительно к решению задач управления КА в режиме реального времени. На основании выбранных критериев сделаны выводы о возможности применения алгоритмов для решения задач управления КА.

- Создана программа на языке C++, реализующая математическую модель движения КА «Океан-О» относительно центра масс.
- Разработаны алгоритм и программа трехмерной визуализации результатов численных исследований движения КА относительно центра масс, с применением технологии клиент-сервер в качестве интерфейса.
- По результатам модельных исследований движения КА относительно центра масс с помощью ТВР проведен анализ и выработан алгоритм управления КА «Океан-О» в нештатном режиме эксплуатации.

#### Практическая значимость работы

Разработанные в диссертации математические модели, алгоритмы и программы использованы специалистами ЦНИИМАШ, КБ «Южное» при решении задач визуального анализа нештатного режима управления полетом КА «Океан-О» с помощью изменения положения солнечной батареи.

Кроме того, результаты работы использованы в качестве учебных пособий в Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С. П. Королева и Московском государственном университете леса на кафедре САУ.

#### Апробация работы.

Основные положения работы обсуждались на научных семинарах в ЦНИИМАШ и в процессе подготовки научно-технических отчетов по темам «ОРЕЛ» и «ГРИФ», выполняемых предприятием ЦНИИМАШ-ЭКСПОРТ в рамках ФКП России.

#### Публикации

Исследования были опубликованы в отечественных и зарубежных специализированных изданиях, а также докладывались и получили одобрение на всероссийских и международных научных конференциях (всего 14 публикаций).

#### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключение, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 131 страница, включающий 49 рисунков и 8 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цели и задачи работы, определяются теоретические и методологические основы работы, анализируется степень научной новизны и практическая значимость диссертации, приводится общая характеристика работы и обзор содержания.

**В первой главе** кратко излагаются основные этапы возникновения и развития ТВР, рассматриваются аппаратные и программные компоненты систем, основанных на ТВР, и их предназначение. Проводится классификация существующих систем, и даются рекомендации по использованию технологии компьютерного синтеза изображений для решения различных задач космонавтики.

Термин «виртуальная реальность» впервые был использован в Массачусетском Технологическом Институте в конце 1970-х годов для выражения идеи присутствия человека в создаваемом компьютером пространстве, а слово «виртуальный» (лат. *virtualis* - возможный, условный) было впервые использовано Дунсом Скотом (ум. в 1308) в его теории реальности.

В настоящее время термин «виртуальная реальность» определяется следующим образом: виртуальная реальность это совокупность средств, воздействующих на органы чувств и позволяющих создать у человека иллюзию нахождения в искусственно созданном мире, путем подмены обычного восприятия окружающей действительности информацией, генерируемой компьютером.

В основе современной технологии виртуальной реальности лежит использование имитационного моделирования, компьютерной графики, техники взаимодействия человека с машиной, теории дистанционного управления.

Впервые возможности виртуальной реальности были продемонстрированы на первых киносеансах еще в начале XX века, когда зрители в ужасе бежали от движущегося на экране поезда.

Следующим шагом было создание, запатентованного в 1929 году летного тренажера, который позволял создавать удовлетворительное ощущение движения и имитировать боковые виды с помощью фильмов.

В 1957 году был запатентован первый головной дисплей, а в 1960-х годах впервые был разработан стереоскопический головной дисплей и первая компьютерная программа для работы с графикой.

В 1972 году, в рамках разработки технологии обучения пилотов сверхскоростных самолетов был создан первый периферийный дисплей, в работе которого учитывалось движение человеческих глаз.

В настоящее время системы, основанные на ТВР, содержат зрительную подсистему, звуковую подсистему и систему ориентации в пространстве. Системы ВР условно делятся по уровню погружения в виртуальную среду:

Начальный уровень погружения обеспечивается т.н. «оконной» системой, характеризующейся использованием стандартных компонентов ПК: монитора, клавиатуры, мыши или джойстика.

Частичное погружение, характеризуется использованием специальных компонент: стерео монитора или стерео очков, стерео колонок, трехмерной мыши или перчатки.

Полное погружение предусматривает использование специальных средств: виртуального шлема, отслеживающего положения головы, системы трехмерного звука, специальных костюмов и перчаток, обеспечивающих воздействие на осязание и ориентацию, а также устройств, воздействующих на чувство равновесия.

В настоящее время можно выделить следующие типы используемых на практике систем ВР:

- кабинные симуляторы;
- системы искусственной реальности;
- системы «расширенной» реальности;
- системы телеприсутствия;
- настольные системы виртуальной реальности;
- визуально согласованные дисплеи.

Перечисленные выше системы применяются для достижения следующих целей:

- оценки качества выбранных решений;
- создания реалистичной обстановки;
- повышения эмоционального воздействия на наблюдателя.

При этом решаются следующие задачи:

- графическое моделирование для наглядного представления процессов;
- трехмерное моделирование объектов;
- имитация динамических ситуаций;
- дистанционное управление объектами;
- создание анимационных моделей.

В первой главе диссертации показано, что многообразие типов систем ВР, целей и задач, решаемых ими, требуют проведения специальных теоретических исследований по выбору методов компьютерного синтеза изображений применительно к решению задач управления полетом КА.

**Во второй главе** проводится анализ существующих методов генерации изображений и дается их классификация. Формулируются критерии для сравнения различных алгоритмов и методов построения изображений. Даются рекомендации по использованию технологии компьютерного синтеза изображений для различных задач космонавтики.

Главным каналом восприятия информации является зрительный. В связи с этим ключевой проблемой внедрения ТВР в космонавтике является анализ и выбор высокоскоростных алгоритмов построения изображений, обеспечивающих высокий уровень реалистичности изображений в условиях ограниченности вычислительных ресурсов наземной и бортовой вычислительной техники.

Таким образом, основные требования к алгоритмам построения изображений применительно к задачам управления полетом КА формулируются следующим образом:

- работоспособность в реальном времени;
- работоспособность в условиях ограниченности вычислительных ресурсов;
- получение реалистичного изображения динамического моделирования поведения объектов.

Для анализа эффективности методов построения изображений в работе предложены критерии их сравнения с позиции соответствия выдвинутым выше требованиям.

Требование работоспособности в реальном времени для систем генерации изображений подразумевает возможность создания динамического изображения, дающего представление о взаимном положении объектов и их движении в реальном масштабе времени. В качестве критерия для количественных оценок с позиции требования работы алгоритмов в реальном времени предложено использовать реализуемую частоту кадров (количество изображений (кадров) генерируемых в единицу времени), которая должна обеспечивать физиологическое ощущение отсутствия мельканий (не менее 20 кадров в секунду).

Под работоспособностью алгоритмов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов подразумевается возможность их реализации на основе персонального компьютера (ПК) стандартной комплектации, В частности предполагается, что ПК имеет не менее 128 МБ оперативной памяти (RAM-S), процессор с частотой 1 ГГц и аппаратный ускоритель трехмерной графики. Главными ограничениями вычислительных ресурсов ПК являются загрузка центрального процессора (ЦП) и требуемый объем оперативной памяти (ОП).

Поэтому в качестве критерия сравнения используется объем оперативной памяти. А для оценки загрузки ЦП используется уже введенный ранее показатель - частота кадров. Чем меньше загрузка ЦП, тем больше кадров может быть создано в единицу времени и, следовательно, выше реализуемая частота.

Существующие алгоритмы и методы построения изображений делятся на две группы:

1. Основанные на физических принципах.
2. Основанные на аппаратном ускорении.

В основе методов, базирующихся на физических принципах, лежит расчет глобальной освещенности. К ним относятся метод трассировки лучей и метод излучательности.

Метод трассировки лучей (ray tracing) заключается в моделировании прохождения лучей по законам геометрической оптики. На практике обычно используется алгоритм Витеда, известный под названием алгоритма обратной трассировки лучей. (Рис. 1)

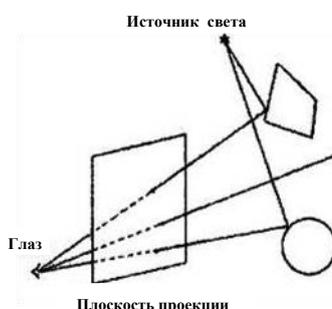


Рис. 1. Принципиальная схема метода обратной трассировки лучей.

Из глаза наблюдателя выпускается луч до точки ближайшего пересечения с каким-либо объектом. Цвет (освещенность) соответствующей точки пересечения будет определяться долей световой энергии, попадающей в эту точку и покидающей ее в направлении глаза. Из точки пересечения выпускаются лучи ко всем источникам света для проверки их видимости и определения непосредственной освещенности точки пересечения. Выпускаются также отраженный и преломленный лучи, которые, трассируются, до ближайшего пересечения с объектами сцены, и так далее. Критериями остановки расчета служат превышение допустимого количества вложений рекурсии (отсечение по глубине) или уменьшение вклада в общую освещенность до некоторого порогового значения (по весу).

Достоинство метода - высокое качество получаемого изображения. Недостатки метода: неэффективная работа с диффузными поверхностями, необходимость повторного пересчета при изменении положения наблюдателя, высокие требования к вычислительным ресурсам.

В работе показано, что метод трассировки лучей не сможет работать в ближайшие годы в реальном времени на ПК стандартной комплектации. Однако может быть применим в ближайшие 3-5 лет для создания анимационных моделей в целях информирования общественности и рекламы космических программ и проектов.

Метод излучательности (radiosity) основан на законе сохранения энергии в замкнутой системе.

Все объекты разбиваются на фрагменты и для них записывается уравнение баланса энергии. Предварительно для каждого фрагмента вычисляется коэффициент формы (форм-фактор). В результате решения полученной системы уравнений определяется значение освещенности каждого фрагмента.

Достоинствами метода излучательности являются: высокое качество получаемого изображения; возможность расчета освещенности независимо от положения наблюдателя; высокая точность при работе с диффузными поверхностями. Недостатками метода являются: необходимость повторного расчета при изменении положения объектов; высокие требования к вычислительным ресурсам.

Анализ показал, что метод излучательности, как и метод трассировки лучей, в ближайшие 3-5 лет не имеет перспективы применения в космонавтике для создания систем визуализации, работающих в реальном времени. Этот метод, также как и метод обратной трассировки лучей, целесообразно использовать для создания анимационных моделей в целях информирования общественности и рекламы космических программ и проектов, а также для разработки анимационных моделей, как элемента экспертных систем.

Аппаратные методы не позволяют рассчитывать глобальную освещенность, но позволяют рассчитывать локальную освещенность в реальном времени.

Основой для всех аппаратных алгоритмов является метод Z-буфера, который использует значения z-координаты текущей точки для сравнения со значением в буфере. В результате освещенность точки определяется объектом, находящимся наиболее близко к наблюдателю. (Рис. 2)

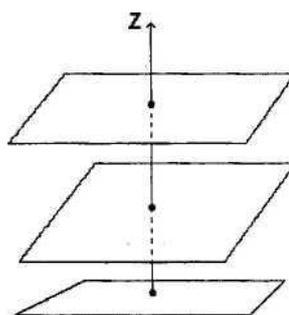


Рис. 2. Принципиальная схема метода Z-буфера.

Можно выделить несколько основных подходов к построению теней:

1. Преобразование модели «на землю» и отрисовка ее как тени.
2. Создание т.н. «теневых объемов».

Алгоритм преобразование модели «на землю» отличается простотой реализации и хорошим качеством получаемой тени, но при этом дает возможность построения только плоской тени, что снижает степень реализма

Впервые алгоритм был описан Джимом Блинном. В своей статье он описал уравнения для проецирования полигона «на землю», т.е. на плоскость  $z=0$ , в направлении от источника света.

Метод использует геометрические взаимоотношения источника света и полигонов для вычисления проекции каждого полигона модели «на землю». «Теневые полигоны» должны быть рассчитаны для каждого источника света, т.е. если объект освещается  $N$  источниками света, то необходимо рассчитать  $N$  его «теневых проекций».

Для построения объемной тени используется метод теневых объемов.

При освещении сцены в тени оказываются те объекты, которые попадают внутрь т.н. теневого объема. Теневой объем - это представление пространства за объектом, из которого не наблюдается источник света, в виде полигонального объекта (рис. 3).

Для того чтобы точка была затенена, луч света должен войти в теневые объемы большее число раз, нежели выйти из них, т.е. остаться внутри хотя бы одного теневого объема.



Рис. 3. Принципиальная схема метода теневых объемов.

В настоящее время метод теневых объемов поддерживается аппаратно и может работать в реальном времени, требуя при этом большого количества вычислительных ресурсов. Метод может быть использован в системах, работающих в реальном времени для решения следующих задач:

- комплексного анализа нештатных ситуаций КА на орбите;
- разработки операций на орбите и их послеполетного анализа;
- моделирования и отображения операций на орбите в режиме реального времени;
- решения специальных задач (например, при сканировании Земной поверхности спутником ДЗЗ для контроля наведения аппаратуры наблюдения на центр участков сканирования в режиме покадровой съемки).

Сравнительный анализ эффективности алгоритмов генерации изображений (табл. 1) показал, что в настоящее время требованиям, выдвигаемым для решения практических задач управления полетом, удовлетворяют только алгоритмы, основанные на аппаратном ускорении, в частности метод теневых объемов. Основное преимущество этой группы алгоритмов заключается в более эффективном использовании вычислительных ресурсов за счет применения специализированных аппаратных средств, которые уже стали стандартной компонентой современного ПК. В то же время метод теневых объемов позволяет обеспечить достаточно высокое качество получаемого изображения.

Критерии эффективности	Методы генерации изображений					Критические значения
	Трассировки лучей		Излучательности		Теневых объемов	
	не оптимизир.	оптимизир.	не оптимизир.	оптимизир.		
Реализуемая частота, кадр/с	0.01	3.33	0.01	10	100	>20
Требуемый объем памяти, Мб	0.1		100	0.1	10	<RAM-S (128 Мб)

Таблица 1. Количественное сравнение эффективности алгоритмов генерации изображений.

Изображения, созданные с помощью алгоритмов, основанных на физических принципах, превосходят по качеству изображения, созданные с помощью алгоритмов, основанных на аппаратном ускорении. В первую очередь лучшее качество достигается за счет использования более точных математических моделей, основанных на использовании точных физических моделей. Однако требования к мощности вычислительных ресурсов для реализации данных алгоритмов ограничивают их широкое применение в ближайшие 3-5 лет для решения практических задач управления полетом в режиме реального времени.

Таким образом, в первом разделе диссертации обоснована рекомендация выбора метода «теневых объемов» в качестве основного метода компьютерного синтеза изображений при решении задач управления КА в режиме реального времени.

**Третья глава** диссертации посвящена разработке программы, реализующей модель движения КА «Океан-О», которая затем использовалась для анализа характера движения КА в виртуальной среде.

Совместный российско-украинский спутник ДЗЗ «Океан-О» был создан в 1986 году в НПО «Южное», но по ряду причин был запущен только в 1999. За этот период разработчиками были утеряны математические модели и моделирующие стенды, что создало значительные трудности для анализа нештатной ситуации, возникшей в системе управления спутником после его выведения на орбиту.

Как позже выяснилось, причиной нештатной ситуации была ошибка в монтаже системы управления бортовым аппаратным комплексом. В результате маховики не могли полностью компенсировать изменения внешнего возмущающего момента, возникающего из-за изменения параметров атмосферы, вследствие значительной солнечной активности, и КА «Океан-О» терял рабочую ориентацию.

Для решения сложившейся ситуации была реализована новая схема управления объектом, которая заключалась в использовании СБ в качестве «аэродинамического паруса». При этом необходимо было учитывать, что все-таки основным назначением СБ является обеспечение положительного энергобаланса, достаточного для выполнения целевых задач, в том числе и для управления самой СБ. Таким образом, группе управления необходимо было решать одновременно две задачи: с одной стороны поддерживать нестандартным способом рабочую ориентацию КА, а с другой стороны - обеспечивать КА электроэнергией.

При реализации данной схемы управления выявился ряд ограничений: во-первых, при отклонении КА больше чем на  $10^\circ$  от рабочей ориентации по любой из осей связанной системы координат, он терял управление, после чего становилось невозможно использовать СБ для поддержания рабочей ориентации и восстановление ориентации оказывалось возможным только с помощью реактивной системы, что привело к быстрому расходу запасов топлива. Во-вторых, недостаточное количество энергии вследствие неоптимальной ориентации СБ создавало угрозу отключения механизма управления СБ.

Созданная в диссертации программа, реализующая модель движения КА «Океан-О», включает модель движения центра масс КА по орбите и модель движения относительно центра масс. При создании программы были использованы результаты ЦУП ЦНИИМАШ и КБ «Южное» по модельным исследованиям движения КА «Океан-О» по орбите, а также данные о движении относительно центра масс, предоставленные КБ «Южное».

При этом система дифференциальных уравнений (СДУ), описывающих эволюцию вектора абсолютной угловой скорости КА в осях связанной системе координат, имела следующий вид:

$$J\omega = M - \omega \times J\omega, \quad (1)$$

где

$J$  - постоянная матрица тензора инерции в осях связанной системы координат;

$\omega$  - вектор угловой скорости изделия в связанной системе координат;

$M$  - суммарный механический момент, действующий на КА, выраженный в связанной системе координат.

Суммарный механический момент представлялся в виде суммы моментов: гравитационного ( $M_g$ ), аэродинамического ( $M_a$ ), магнитного момента ( $M_m$ ), а также момента, создаваемого маховиками ( $M_H$ ), момента солнечного давления ( $M_s$ ) и момента, обусловленного нежесткостью конструкции спутника ( $M_h$ ):

$$M = M_g + M_a + M_s + M_m + M_h + M_H. \quad (2)$$

Система уравнений (1) является универсальной для расчета движения КА относительно центра масс.

Анализ математической модели движения КА показал, что для учета управляющего воздействия СБ при точности задания угла ее поворота в пределах  $1^\circ$  достаточно учесть только аэродинамический ( $M_a$ ), гравитационный ( $M_g$ ) и управляющий моменты ( $M_H$ ), рассчитываемые по следующим формулам.

$$M_g = -\frac{3\mu}{r^3} e_r \times J e_r \quad (3)$$

где

$\mu$  - гравитационный параметр планеты;

$e_r$  - единичный вектор, направленный к центру планеты;

$r$  - расстояние от спутника до центра планеты.

$$M_h = H + \omega H, \quad (5)$$

где  $H$  - суммарный кинетический момент маховиков.

Математическая модель аэродинамического момента существенно зависит от геометрических характеристик КА, поэтому для них универсальная математическая модель не создавалась.

$$M_a = F(\rho, S), \quad (7)$$

$\rho$  - плотность атмосферы;

$S$  - миделево сечение.

Обобщенная модель движения КА «Океан-О» была реализована по модульному принципу (рис. 4) на языке программирования C++, где каждый момент описывался с помощью собственного модуля. Модульный принцип построения программы дает большую гибкость в настройке модели и позволяет при необходимости полностью заменять некоторые модули. При реализации модели были использованы современные методы

программирования: управление с помощью событий, объектно-ориентированное программирование и выталкивающая многозадачность.

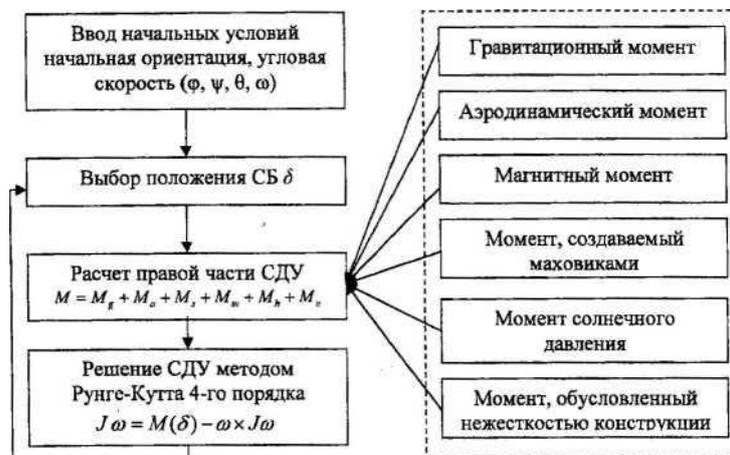


Рис. 4. Блок-схема алгоритма реализации математической модели.

Достоверность разработанной модель движения КА «Океан-О» была подтверждена сравнением полученных результатов расчетов с результатами расчетов по модели, используемой головным разработчиком КА, а также с данными, полученными в результате полета.

**Четвертая глава** посвящена практическому применению разработанных в диссертации моделей и программ визуализации и расчетов движения КА «Океан-О» для управления его полетом в нештатном режиме с помощью СБ.

Для модельных исследований движения КА «Океан-О» в виртуальной среде в рамках диссертации была разработана специальная программа компьютерного синтеза изображений, основанная на использовании стандартных библиотек и программных пакетов, таких как Microsoft DirectX, Discreet 3D MAX, Satellite Tool Kit (Analytical Graphics) и виртуальной среды визуализации (Рис. 5), базирующейся на эффективных алгоритмах, основанных на аппаратном ускорении, позволяющих создавать системы, работающие в реальном времени.

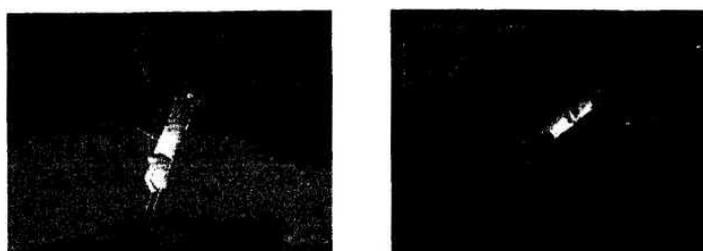


Рис. 5. Визуализация и анализ результатов расчетов динамики движения КА «Океан-О».

Для передачи результатов расчетов программы, реализующей математическую модель движения КА «Океан-О» относительно центра масс, и виртуальной среды был разработан интерфейс, основанный на технологии клиент-сервер, позволяющий работать в реальном времени. (Рис. 6)

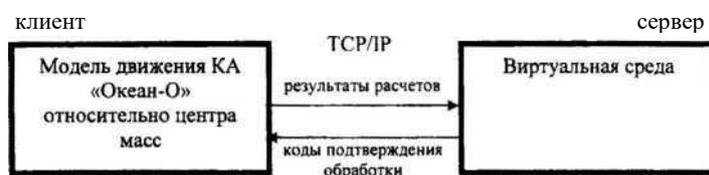


Рис. 6. Модель интерфейса визуализации результатов расчет а математической модели.

В разработанной модели виртуальная среда выступает в качестве сервера, обрабатывающего результаты расчетов в реальном времени, а модель движения КА является клиентом. Связь устанавливается с помощью протокола TCP/IP, что позволяет использовать различные ПК для клиента и сервера, организовав распределенную вычислительную среду. Таким образом организуется визуализация результатов расчетов в реальном времени.

В результате моделирования найдены граничные значения изменения относительной плотности атмосферы, при которых можно управлять ориентацией КА посредством изменения угла поворота солнечной батареи, рассчитано максимально возможное время удержания КА в рабочей ориентации в зависимости от плотности атмосферы и угла СБ. Вводя в качестве ограничения минимально возможный угол поворота СБ, при котором возможно поддержание положительного энергобаланса, и учитывая найденную зависимость времени удержания КА в рабочей ориентации от плотности атмосферы и угла поворота СБ подбиралось рациональное положение СБ, удовлетворяющее поставленным задачам поддержания рабочей ориентации КА и обеспечения его положительного энергобаланса.

В качестве примера, имитирующего реальный процесс управления, моделируется движение КА при изменении плотности атмосферы в 2 раза. При этом в начальный момент изменения плотности атмосферы солнечная батарея устанавливается в положение перпендикулярное потоку ( $0^\circ$ ) или параллельное потоку ( $90^\circ$ ), соответствующее максимальному опрокидывающему моменту в случае увеличения или уменьшения плотности атмосферы соответственно. Таким образом, рассматриваются наихудшие начальные условия для управления методом коррекции положения СБ. Для случая увеличения плотности приводятся рекомендации по изменению положения СБ с целью недопущения перехода кинетического момента двигателя-маховика в область насыщения.

Максимальное насыщение двигателя-маховика составляет  $\pm 20$  Нмс. Увеличение плотности атмосферы ( $t_{изм1}=2 \cdot 10^4$  с) в два раза при угле СБ  $0^\circ$  приводит к полному насыщению маховиков по кинетическому моменту (Рис. 8) через 3 часа, после чего КА начинает совершать хаотические колебания (Рис. 7), а при уменьшении плотности ( $t_{изм2}=2 \cdot 10^4$  с) в два раза при угле СБ  $-90^\circ$  (Рис. 9) полное насыщение по кинетическому моменту (Рис. 10) будет достигнуто через 2 часа, а КА будет стремиться к устойчивому равновесию (угол тангажа  $\sim -90^\circ$ ).

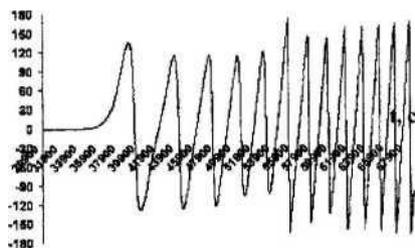


Рис. 7. График зависимости угла тангажа от времени при увеличении плотности атмосферы в 2 раза.

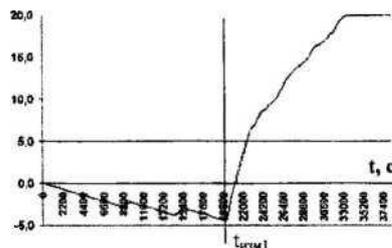


Рис. 8. График зависимости кинетического момента от времени при увеличении плотности атмосферы в 2 раза.

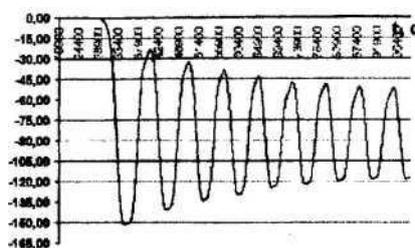


Рис. 9. График зависимости угла тангажа от времени.

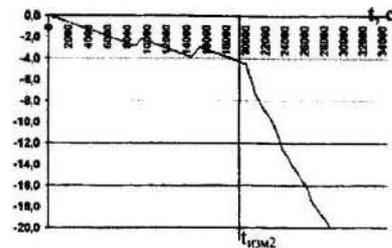


Рис. 10. График зависимости кинетического момента при уменьшении плотности атмосферы в 2 раза от времени при уменьшении плотности атмосферы в 2 раза.

Для сохранения рабочей ориентации КА с помощью метода коррекции положения СБ при увеличении плотности атмосферы в 2 раза проведены расчеты времени перехода кинетического момента маховиков в область насыщения в зависимости от угла поворота СБ в диапазоне от  $0^\circ$  до  $30^\circ$  (табл. 2). В результате расчетов выделен рабочий диапазон угла поворота СБ  $> 27^\circ$ , обеспечивающий теоретически бесконечно устойчивое положение КА в рабочей ориентации при неизменных параметрах атмосферы (рис. 11).

Угол СБ	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
t,с	13331	13746	15118	17718	23068	44997	∞

Таблица 2. Зависимость максимально возможного времени сохранения рабочей ориентации КА от угла СБ при возрастании плотности атмосферы в 2 раза.

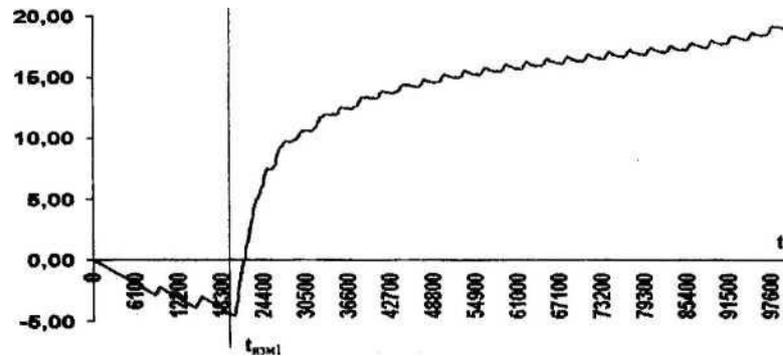


Рис. 11. Зависимость кинетического момента маховиков от времени при угле СБ 27°.

Таким образом, в работе теоретически обоснован способ управления полетом КА «Океан-О» в нештатном режиме с помощью изменения угла поворота СБ. При этом в диссертации разработан и предложен следующий алгоритм управления КА «Океан-О» с применением ТВР:

1. С использованием математической модели проводятся расчеты по предварительному выбору диапазона углов поворота СБ, обеспечивающих ее рациональное положение с позиции обеспечения рабочей ориентации КА и поддержания его положительного энергобаланса.
2. Окончательное решение о выдаче команды управления СБ в процессе сеанса связи с КА принимается по результатам экспертного анализа в виртуальной среде характера движения КА и его энергобаланса в зависимости от положения СБ.

Использование виртуальной среды является ключевым элементом предложенного алгоритма управления на основе экспертных оценок, так как позволяет группе специалистов различного профиля визуально наблюдать и анализировать характер движения при изменении положения СБ, ее направление на Солнце и степень освещенности, как в реальном масштабе времени, так и в ускоренном или замедленном режиме.

Таким образом, при работе с КА «Океан-О» визуальная среда использовалась для решения следующих задач:

- Разработки экспертной системы принятия решений по управлению КА «Океан-О».

- Создания «дружественного» интерфейса для наблюдения за движением КА «Океанов не только специалистами управления, но и руководством, представителям средств массовой информации и др.

Использование трехмерной визуализации является наиболее эффективным решением принципиальной проблемы анализа данных об ориентации КА по элементам кватерниона, которые не имеют геометрической интерпретации, и потому не позволяют специалистам наглядно видеть текущее положение и ориентацию КА. Таким образом, повышается качество восприятия информации и сокращается время на принятие решений.

Предлагаемый метод управления КА с помощью СБ можно отнести к интерактивным целенаправленным методам итерационного поиска решений. Реализация данного метода в системе управления КА «Океан-О» позволяет определить ее в качестве автоматизированной системы управления, поскольку принятие управленческого решения происходит в результате интерактивного взаимодействия человека (специалистов управления) и технических средств (система управления КА «Океан-О», средства визуализации и др.)

Для управления КА «Океан-О» с помощью СБ и ТВР в работе рекомендован следующий алгоритм:

1. Обработка данных прогноза изменения параметров атмосферы на период не менее суток.
2. Выбор минимально возможного угла поворота СБ, при котором КА теоретически сохраняет рабочую ориентацию бесконечное время.
3. Оценка состояния энергобаланса КА.
4. Выбор методом экспертных оценок положения СБ, при котором КА будет сохранять рабочую ориентацию до проведения следующего сеанса связи, при обеспечении необходимого для функционирования КА запаса электроэнергии.

**В заключении** приводятся основные результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- Обоснована актуальность применения технологии компьютерного синтеза изображений и даны рекомендации по ее использованию для решения различных **задач** космонавтики.
- Сформулированы критерии выбора алгоритмов компьютерного синтеза изображений для решения задачи визуализации модельных исследований в области динамики движения КА.
- Разработаны математическая модель, алгоритм и программа визуализации результатов численных исследования движения КА относительно центра масс.
- Разработана программа, реализующая математическую модель движения КА «Океан-О» относительно центра масс на языке C++.
- Проведены модельные исследования различных режимов движения КА «Океан-О» относительно центра масс.
- Проведен анализ движения и выработаны алгоритм управления КА с использованием ТВР для решения задач управления КА «Океан-О».

**Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:**

1. Иванов Н.М., Олейник А.Г., Цветков А.Б. Методы компьютерного синтеза изображений для решения задач проектирования и эксплуатации сложных космических систем. // Вестник Российской Академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, Самара, 2000, с. 57-62.
2. Олейник А.Г. Сравнительный анализ методов и алгоритмов, используемых для компьютерного синтеза изображений сложных космических систем. // Вестник Российской Академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, Самара, 2000, с. 62-68.
3. Олейник А.Г. Применение технологии виртуальной реальности для решения задач управления спутником «Океан-О» при нештатном режиме эксплуатации. // Сборник трудов Десятого всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. Самара, 2001, с. 75-76.
4. Анфимов Н.А., Олейник А.Г., Цветков А.Б. Применение технологии высокореалистичной визуализации на завершающем этапе эксплуатации орбитальной станции «МИР». // Космонавтика и ракетостроение, №12, 2001, с. 141-142.
5. Олейник А.Г., Цветков А.Б., Цибульский С.И. Интеграция российской космической промышленности в мировой космический рынок: состояние, перспективы, проблемы, стратегии. // Тезисы доклада на XXVI Академических чтениях по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева, Москва, 2002, с. 57-58.
6. НТО №811-93295-4447-30 «Разработка проекта системы дистанционного информационного обмена по компьютерным сетям соисполнителей программы «ОРЕЛ». // ЦНИИМАШ-ЭКСПОРТ, 1998. - 98с.
7. НТО №811-93295-4447-23 «Исследование проблем согласования российских и зарубежных технико-экономических показателей базовых концепций МКТС, а также технико-экономических моделей и методик проектирования МКТС». // ЦНИИМАШ-ЭКСПОРТ, 1998. - 94с.
8. НТО №811-93295-4447-23 «Доработка методики, математической модели и программного обеспечения для проведения комплексного сравнительного анализа вариантов МКТС». // ЦНИИМАШ-ЭКСПОРТ, 1998. - 120с.
9. НТО №811-93295-4447-56 «Разработка системы дистанционного информационного обмена по компьютерным сетям соисполнителей программы «ОРЕЛ». // ЦНИИМАШ-ЭКСПОРТ, 1999. - 105с.
10. НТО №811-93295-4447-37 «Исследования в обеспечение разработки технологий информационного обмена российских соисполнителей программы «ОРЕЛ-21» между

собой и с зарубежными партнерами с учетом требований по защите информационных ресурсов российской компьютерной сети». // ЦНИИМАШ-ЭКСПОРТ, ответственный исполнитель, 1999. - 115с.

11. НТО №20-01/1-12. «Разработка ключевых технологий, системные исследования и комплексное обоснование перспектив создания и использования многоразовых ракетно-космических систем (МРКС)». ЦНИИМАШ-ЭКСПОРТ, 2001. - 116с.
12. Ivanov N., Kudryavtsev S. Koluka Yu., Oleynik A., Tsvetkov A. Mir station de-orbiting strategy. // Proceedings of IV International Conference «Cosmonautics - to the Humankind 2001». Berlin, Germany, 2001, p. 26-27.
13. Oleynik A. The Application of Virtual Reality Technology for Space System Life Cycle Simulation. // Proceedings of IV International Conference «Cosmonautics - to the Humankind 2001». Berlin, Germany, 2001, p. 27-28.
14. Oleynik A., Senkevich V., Tsiboulsky S., Tsvetkov A. Key problem of Russian Space Industry integration into Global Space Market: State-of-the-Art, Past Experience, Prospective. // Proceedings of IV International Conference «Cosmonautics - to the Humankind 2001». Berlin, Germany, 2001. p. 29-30.