

*В.И. КУРЕНКОВ, В.В. САЛМИН, Б.А. АБРАМОВ*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ЦЕЛЕВОГО  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ  
НАБЛЮДЕНИЯ  
С УЧЕТОМ ЭНЕРГОБАЛАНСА**

**2007**



**САМАРА**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

*В. И. КУРЕНКОВ, В. В. САЛМИН, Б. А. АБРАМОВ*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕЛЕВОГО  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ  
НАБЛЮДЕНИЯ  
С УЧЕТОМ ЭНЕРГОБАЛАНСА

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2007

УДК 629.78 (075)  
ББК 39.62  
К 93



**Инновационная образовательная программа  
"Развитие центра компетенции и подготовка  
специалистов мирового уровня в области аэро-  
космических и геоинформационных технологий"**

Рецензенты: гл. научн. сотрудник ГНП РКЦ «ЦСКБ - Прогресс»,  
д-р. техн. наук, проф. А. В. С о л л о г у б;  
канд. техн. наук, доц. А. С. К у ч е р о в

**Куренков В. И.**  
К 93 **Моделирование целевого функционирования космических аппаратов наблюдения с учетом энергобаланса: учеб. пособие**  
*/В. И. Куренков, В. В. Салмин, Б. А. Абрамов. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. - 160 с. : ил.*

**ISBN 978-5-7883-0512-7**

Анализируется влияние характеристик системы электропитания космических аппаратов наблюдения на целевые показатели эффективности космической системы.

Рассматриваются модели для формирования исходных данных по потенциальным объектам наблюдения, предлагаются математические модели для отбора объектов наблюдения, попадающих в полосу обзора космического аппарата. Анализируются методы и математические модели для выбора оптимального маршрута съемки.

Разрабатываются модели и алгоритмы для оценки ориентации панелей солнечных батарей в процессе полета космического аппарата по орбите и целевого функционирования.

Рассматриваются вопросы моделирования энергобаланса на борту космического аппарата с учетом пополнения запасов электроэнергии в аккумуляторных батареях от солнечной батареи и расхода электроэнергии вследствие работы аппаратуры бортовых систем.

Учебное пособие предназначено студентам специальности 160802 «Космические летательные аппараты и разгонные блоки» и специальности 230301 «Моделирование и исследование операций в организационно-технических системах». Оно также может быть полезно молодым специалистам ракетно-космической отрасли.

Подготовлено на кафедре летательных аппаратов.

УДК 629.78 (075)  
ББК 39.62

**ISBN 978-5-7883-0512-7**

© Куренков В. И., Салмин В. В.,  
Абрамов Б. А., 2007

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2007

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	7
ВВЕДЕНИЕ .....	8
1. ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ НА ЦЕЛЕВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАБЛЮДЕНИЯ .....	9
1.1. Влияние мощности системы электропитания космических аппаратов наблюдения на показатели целевой эффективности .....	9
1.2. Влияние этапов создания космического аппарата на энергобаланс и программу целевой работы .....	12
1.3. Влияние ориентации панелей солнечной батареи на мощность системы электропитания .....	13
1.4. Методы оценки баланса электроэнергии и его влияния на показатели производительности КА наблюдения .....	14
2. МОДЕЛИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПО ПОТЕНЦИАЛЬНЫМ ОБЪЕКТАМ НАБЛЮДЕНИЯ .....	15
2.1. Формирование массива потенциальных объектов наблюдения с известными координатами .....	16
2.2. Алгоритм формирования массива случайных координат объектов наблюдения с равномерным законом распределения по поверхности Земли .....	16
2.3. Модели для формирования массива случайных координат объектов наблюдения с равномерным законом распределения по долготе и нормальным законом распределения по широте Земли .....	21
2.3.1. Моделирование реализаций случайных величин с произвольными законами распределения .....	21
2.3.2. Модели и алгоритм для формирования массива случайных координат объектов наблюдения с нормальным законом распределения по широте Земли .....	23
2.4. Модели для формирования массива случайных координат объектов наблюдения с учетом неравномерности распределения по материкам и районам Земли .....	25
2.4.1. Моделирования случайных координат объектов наблюдения с использованием сферических прямоугольников .....	25
2.4.2. Моделирование случайных координат объектов наблюдения с использованием цветовых гамм физической карты мира .....	28
3. МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ОТБОРА ОБЪЕКТОВ НАБЛЮДЕНИЯ, ПОПАДАЮЩИХ В ПОЛОСЫ ОБЗОРА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НАБЛЮДЕНИЯ .....	28
3.1. Алгоритм отбора объектов наблюдения, попадающих в полосы обзора космического аппарата наблюдения, на основе имитационного моделирования целевого функционирования .....	28
3.2. Модели для отбора объектов наблюдения, попадающих в полосу обзора, на основе аналитического описания относительного движения КА и объекта наблюдения .....	29
3.2.1. Методика отбора объектов наблюдения .....	32
3.2.2. Описание модели отбора объектов наблюдения .....	36

3.2.3. Условия попадания объектов наблюдения в полосу обзора космического аппарата .....	52
3.2.4. Алгоритм отбора объектов, попадающих в полосу обзора космического аппарата наблюдения .....	57
<b>4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ВЫБОРА МАРШРУТА СЪЕМКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НАБЛЮДЕНИЯ .....</b>	<b>61</b>
4.1. Критерии выбора маршрута съемки космического аппарата наблюдения .....	61
4.2. Алгоритм выбора маршрута съемки методом динамического программирования .....	63
4.3. Моделирование производительности космического аппарата наблюдения на основе ограничений поворота по углу тангажа .....	64
4.4. Алгоритм моделирования производительности космического аппарата наблюдения .....	68
<b>5. МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОРИЕНТАЦИИ ПАНЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НАБЛЮДЕНИЯ .....</b>	<b>70</b>
5.1. Модели для оценки среднего косинуса угла между нормалью к плоскости панели солнечной батареи и направлением на Солнце на основе относительного времени целевой работы космического аппарата .....	70
5.2. Математические модели и алгоритмы для оценки текущего значения косинуса угла между нормалью к поверхности солнечных батарей и направлением на Солнце без учета затенения элементами КА.....	75
5.2.1. Постановка задачи определения косинуса угла между нормалью к поверхности солнечных батарей и направлением на Солнце и этапы решения .....	75
5.2.2. Базовая система координат космического аппарата и типовые схемы установки аппаратуры наблюдения .....	79
5.2.3. Изменение ориентации базовой системы координат космического аппарата в стартовой и барицентрической орбитальной системах координат в процессе выведения спутника на орбиту и перевода его в рабочее положение .....	81
5.2.4. Определение координат единичного вектора к поверхности неподвижной панели солнечной батареи в базовой системе координат.....	85
5.2.5. Определение координат единичного вектора к поверхности подвижной панели солнечной батареи в базовой системе координат.....	87
5.2.6. Определение координат единичного вектора направления на Солнце в неподвижной геоцентрической системе координат .....	92
5.2.7. Пересчет координат единичного вектора направления на Солнце из неподвижной геоцентрической системы координат в геоцентрическую орбитальную систему координат, связанную с перицентром орбиты.....	93
5.2.8. Пересчет координат единичного вектора направления на Солнце из геоцентрической орбитальной системы координат,	

связанной с перицентром орбиты, в барицентрическую орбитальную систему координат .....	100
5.2.9. Пересчет координат единичного вектора направления на Солнце из барицентрической орбитальной системы координат в систему координат, связанную с центром масс космического аппарата и центром Земли .....	101
5.2.10. Пересчет координат единичного вектора направления на Солнце из системы координат, связанной с центром масс космического аппарата и центром Земли, в базовую систему координат .....	105
5.2.11. Расчет косинуса угла между нормалью к поверхности панели солнечной батареи и направлением на Солнце в базовой системе координат .....	111
5.2.12. Алгоритм для оценки текущего значения косинуса угла между нормалью к поверхности солнечной батареи и направлением на Солнце без учета затенения .....	111
<b>6. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ЗАТЕНЕНИЯ ПАНЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ.....</b>	<b>117</b>
6.1. Методический подход к оценке степени затененности панелей солнечной батареи.....	117
6.2. Рассматриваемые показатели .....	118
6.3. Требования к геометрическим моделям и метод моделирования геометрии космического аппарата.....	120
6.4. Моделирование геометрических обводов корпуса космического аппарата.....	122
6.5. Моделирование геометрических характеристик панели солнечной батареи.....	126
6.5.1. Моделирование геометрии элементов солнечной батареи в плоскости панели.....	126
6.5.2. Моделирование геометрии панели солнечной батареи в пространстве .....	127
6.6. Общий алгоритм вычисления затенения панели солнечной батареи .....	130
6.7. Программная реализация алгоритмов и моделей для оценки степени затенения панелей солнечной батареи .....	135
6.7.1. Методы программирования, используемые при моделировании затенения панелей солнечной батареи элементами корпуса КА.....	135
6.7.2. Программная реализация моделирования геометрии корпуса КА и панелей солнечной батареи.....	137
<b>7. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОРИЕНТИРОВАННОГО ПОЛЕТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ОЦЕНКИ СРЕДНЕГО КОСИНУСА УГЛА МЕЖДУ НОРМАЛЬЮ К ПОВЕРХНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ И НАПРАВЛЕНИЕМ НА СОЛНЦЕ .....</b>	<b>139</b>
7.1. Методический подход к моделированию неориентированного полета космического аппарата для оценки среднего косинуса угла	

между нормалью к поверхности солнечной батареи и направлением на Солнце .....	140
7.2. Алгоритм оценки среднего косинуса угла между направлением на Солнце и нормалью к поверхности солнечной батареи .....	141
7.3. Программная реализация алгоритмов и моделей для оценки среднего косинуса угла между нормалью к поверхности панели солнечной батареи и направлением на Солнце в неориентированном полете КА .....	149
<b>8. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГООБАЛАНСА НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ПРОЦЕССЕ ЦЕЛЕВОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ .....</b>	<b>150</b>
8.1. Состав моделей для оценки энергобаланса на борту космического аппарата наблюдения в процессе целевого функционирования .....	151
8.2. Типовая электрическая схема системы электропитания космического аппарата .....	152
8.3. Исходные данные для имитационного моделирования энергобаланса на борту космического аппарата .....	153
8.4. Математические модели и алгоритм для оценки энергобаланса на борту космического аппарата с учетом заряда и разряда аккумуляторных батарей .....	155
8.5. Алгоритм имитационного моделирования для оценки показателей эффективности космической системы наблюдения с учетом энергобаланса .....	158
8.6. Упрощенные модели и алгоритм для имитации поворота корпуса космического аппарата в процессе целевой работы .....	161
8.7. Программная реализация алгоритмов и моделей для оценки энергобаланса на борту космического аппарата .....	163
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>169</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>170</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие «Моделирование целевого функционирования космических аппаратов наблюдения с учетом энергобаланса» предназначено студентам специальности 160802 «Космические летательные аппараты и разгонные блоки» и специальности 230301 «Моделирование и исследование операций в организационно-технических системах». Оно может быть использовано при изучении теоретического материала, при выполнении лабораторных работ, курсовых проектов и дипломном проектировании по дисциплинам данных специальностей.

Настоящее учебное пособие также может быть полезно специалистам ракетно-космической отрасли.

В учебном пособии учтены современные требования к космическим аппаратам детального и оперативного наблюдения и тенденции их развития. Следует отметить, что многие разделы настоящего учебного пособия оригинальны, разработаны лично авторами и публикуются впервые.

Материал настоящего учебного пособия является логическим продолжением учебного пособия [1] «Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения» авторов Куренкова В. И., Салмина В. В., Абрамова Б. А., изданного в 2006 г. в издательстве Самарского государственного аэрокосмического университета в рамках инновационной образовательной программы.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам: научному сотруднику ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» профессору А. В. Соллогу и доценту кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов А. С. Кучерову за ценные замечания и рекомендации, которые были учтены при подготовке рукописи учебного пособия к изданию.



Учебное издание

*Куренков Владимир Иванович  
Салмин Вадим Викторович  
Абрамов Борис Анатольевич*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕЛЕВОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАБЛЮДЕНИЯ  
С УЧЕТОМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГОБАЛАНСА**

*Учебное пособие*

Технический редактор А. Г. П р о х о р о в  
Редакторская обработка Н. С. К у п р и я н о в а  
Корректорская обработка Л. Я. Ч е г о д а е в а  
Доверстка В. С. Т е л е п о в а

Подписано в печать 10.10.07 г. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 10,0.

Тираж 120 экз. Заказ . ИП-72 / 2007

Самарский государственный  
аэрокосмический университет.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского государственного  
аэрокосмического университета.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.