

Алгоритмы формирования программ управления космическим аппаратом дистанционного зондирования Земли

О.Л. Старинова
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
starinova.ol@ssau.ru

И.С. Ткаченко
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
tkachenko.is@ssau.ru

Р. М. Хабибуллин
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
khabibullin.rm@ssau.ru

Д. Чень
Нанкинский университет науки и
технологий
Нанкин, Китай
juliacchen@njjust.edu.cn

М.А. Иванушкин
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
ivanushkin.ma@ssau.ru

И.В. Чернякна
Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
chernyakina.iv@ssau.ru

Аннотация—Для выполнения целевых показателей дистанционного зондирования земли (КА ДЗЗ) требуется формирование, изменение и поддержание рабочих орбит космического аппарата. Длительные сроки существования современных космических систем ДЗЗ (до 20 лет) требуют выполнения этих манёвров с минимальными затратами рабочего тела. Двигательные установки на базе электроракетных двигателей (ЭРДУ) обладают высоким удельным импульсом (15000-70000 м/с), что обеспечивает выполнение этих условий. Кроме того, они удовлетворяют требованиям по длительности функционирования. За последние десятилетия была разработана теория оптимального управления КА с ЭРДУ на околоземных орбитах. Однако получение оптимальных программ управления – длительный вычислительный процесс. Данная работа посвящена анализу существующих оптимальных решений и разработке устойчивых алгоритмов формирования программ управления КА ДЗЗ с ЭРДУ для широкого класса динамических манёвров.

Ключевые слова— электроракетный двигатель, космический аппарат, алгоритм формирования управления

1. ВВЕДЕНИЕ

Для выполнения целевых показателей дистанционного зондирования земли (КА ДЗЗ) требуется формирование, изменение и поддержание рабочих орбит космического аппарата. Длительные сроки существования современных космических систем ДЗЗ (до 20 лет) требуют выполнения этих манёвров с минимальными затратами рабочего тела. Двигательные установки на базе электроракетных двигателей (ЭРДУ) обладают высоким удельным импульсом (15000-70000 м/с), что обеспечивает выполнение этих условий. Кроме того, они удовлетворяют требованиям по длительности функционирования. За последние десятилетия была разработана теория оптимального управления КА с ЭРДУ на околоземных орбитах [1 - 2]. Однако получение оптимальных программ управления – длительный вычислительный процесс. Данная работа посвящена анализу существующих оптимальных решений и разработке устойчивых алгоритмов формирования программ управления КА ДЗЗ с ЭРДУ для широкого класса динамических манёвров.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Целью работы является разработка алгоритмического обеспечения для баллистического обоснования процессов формирования, изменения и поддержания заданных орбит малого космического аппарата с электроракетными двигателями малой тяги, предназначенного для дистанционного зондирования Земли. Полученные алгоритмы формирования программного управления обеспечивают поиск локально-оптимальных управлений для выполнения динамических манёвров изменения одного из следующих орбитальных параметров: радиуса перигея, радиуса апогея, наклона, эксцентриситета, долготы восходящего узла, аргумента перигея и поддержания заданной высоты орбиты.

Проведённый анализ проектов существующих и перспективных малых КА ДЗЗ с ЭРДУ [3 - 4] позволил определить диапазон рассматриваемых проектных параметров (таблица 1).

Таблица 1. ДИАПАЗОН ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Проектный параметр	Диапазон изменения
Удельный импульс, м/с	от 100 до 20000
Тяга ДУ, Н	от 0,01 до 10
Максимальная продолжительность работы двигательной установки, с	900
Максимальное количество включений двигательной установки	10 000
Масса ДУ, кг	от 0,5 до 10
Масса рабочего тела, кг	от 0,01 до 50
Масса КА, кг	от 3 до 150

Для моделирования использовались уравнения управляемого движения в инерциальной геоцентрической комбинированной системе координат и дифференциальные уравнения изменения оскулирующих элементов текущей орбиты. Пересчёт между оскулирующими элементами орбиты и фазовыми координатами КА осуществлялся автоматически в каждый момент времени. Учитывались возмущения от несферичности гравитационного поля Земли до второй зональной гармоникой включительно, влияние атмосферы

Земли и светотеневая обстановка на орбите на текущую дату проведения манёвров. Структура алгоритмов разработанного баллистического обеспечения позволяет учитывать и другие существенные возмущения, но на данном этапе работы они не учитывались.

Программы изменения направления маршевого ускорения и включения-выключения ЭРДУ формировались в соответствии с разработанными алгоритмами обеспечивающими достижение требуемых орбитальных параметров и базирующимися на использовании всюду определённых локально-оптимальных законах [5]. Вектор управляющих параметров изменялся в зависимости от текущих фазовых координат или орбитальных элементов. Например, на рисунке 1 показана зависимость первого угла направления маршевого управления для увеличения радиуса перигея орбиты, на рисунке 2 – изменение радиуса перигея, на рисунке 3 – изменение трансверсальной компоненты скорости, ана рисунке 4 полученная траектория возмущённого управляемого движения.

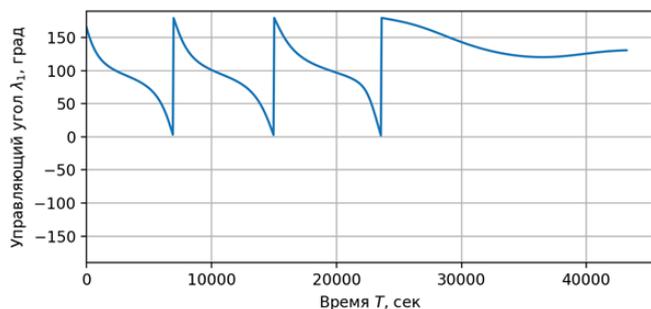


Рис. 1. Программа управления для увеличения радиуса перигея орбиты

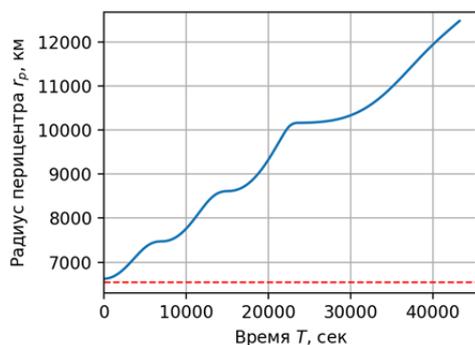


Рис. 2. Изменение радиуса перигея КА в процессе манёвра

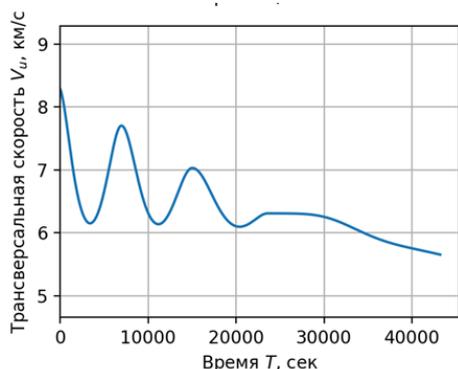


Рис. 3. Изменение трансверсальной компоненты скорости КА

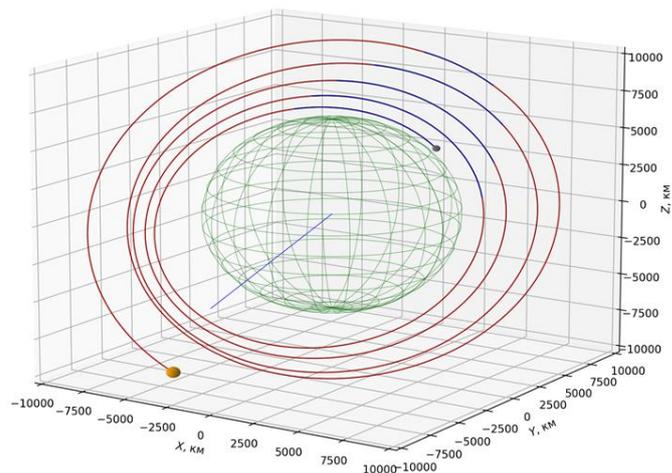


Рис. 4. Траектория КА при увеличении радиуса перигея орбиты

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование алгоритмов управления КА с ЭРДУ построенных на базе локально-оптимальных законов управления позволяет сформировать алгоритмы построения баллистического обеспечения манёвров формирования, изменения и поддержания рабочих орбит КА ДЗЗ без привлечения трудоёмких и ресурсозатратных методов поиска оптимального управления. Проведённое моделирование управляемого движения с учётом возмущений показало незначительное ухудшение полученных законов управления по критерию минимальных затрат рабочего тела для широкого класса динамических манёвров (на более чем на 7 % в указанном в таблице I диапазоне проектных параметров

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-29-01092.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Салмин, В.В. Проектно-баллистический анализ транспортных операций космического буксира с электроракетными двигателями при перелетах на геостационарную орбиту, орбиту спутника Луны и в точки либрации системы Земля-Луна / В.В. Салмин, О.Л. Старинова, А.С. Четвериков, Н.А. Брюханов, И.И. Хамиц, И.М. Филиппов, А.А. Лобыкин, Л.С. Бурьянов // Космическая техника и технологии. – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 82-97.
- [2] Иванюхин, А.В. Низкоэнергетические квазиоптимальные траектории с малой тягой к точкам либрации и гало-орбитам / А.В. Иванюхин, В.Г. Петухов // Космические исследования. – 2020. – Т. 58, № 2. – С. 165-176.
- [3] Кирилин, А.Н. Основные проектные характеристики малых космических аппаратов научного и прикладного назначения на базе унифицированной платформы "АИСТ-2" / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, А.И. Бакланов, Р.Н. Стратилатов, В.И. Абрашкин, Е.В. Космодемьянский, С.И. Ткаченко, В.В. Салмин, И.С. Ткаченко, С.Л. Сафронов // Космическая техника и технологии. – 2020. – Т. 31, № 4. – С. 5-20.
- [4] Кульков, В.М. Принципы построения и области применения малых космических аппаратов на базе унифицированных космических платформ / В.М. Кульков, С.О. Фирсюк, А.М. Юров, С.А. Тузиков, Ю.Г. Егоров, Ю.С. Ук // Космические аппараты и технологии. – 2022. – Т. 6, № 2(40). – С. 133-143.
- [5] Сомов, С.Е. Автономное цифровое управление мини-спутником землеобзора в режимах начальной ориентации / С.Е. Сомов, Т.Е. Сомова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 22, № 5. – С. 84-93.