

Сухов П.А. Формирование оптимального управления при выведении космического аппарата на орбиту в информационном пространстве [Электронный ресурс] // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования: Научный интернет-журнал. 2013. – № 5(15). Режим доступа http://iea.gostinfo.ru/files/2013_05/2013_05_11.pdf – 0,6 п.л.

УДК 681.513.6

ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ВЫВЕДЕНИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ОРБИТУ В ИНФОРМАЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Сухов П.А., аспирант ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»,
e-mail: suhov_petr@mail.ru

Проведен анализ циклограммы запуска при выведении космического аппарата на целевую орбиту, этапов функционирования системы управления разгонным блоком, математической модели описывающей выведение космического аппарата. На основании полученной математической модели проведена постановка задачи оптимального управления в целевом информационном пространстве с использованием принципа максимума Понтрягина.

Ключевые слова: энтропия покрытия, оптимальное управление, информационное пространство, принципа максимума Понтрягина, разгонный блок.

УДК 681.513.6

FORMATION OF OPTIMAL CONTROL DURING INSERTION OF THE SPACECRAFT INTO ORBIT IN THE INFORMATION SPACE

Sukhov P.A., post-graduate FGUE «STANDARTINFORM»,
e-mail: suhov_petr@mail.ru

The analysis timeline start during insertion of the spacecraft into its target orbit, phases of functioning of a control system of the upper block unit, a mathematical model describing the removal of the spacecraft. On the basis of the obtained mathematical model held the formulation of the optimal control problem in the target information space using the Pontryagin's maximum principle.

Key words: covering entropy, optimum process control, information space, Pontryagin's maximum principle, upper block.

Выведение космического аппарата (КА) на целевую орбиту в среднюю или дальнюю космическую зону, при применении разгонного блока (РБ) с автоматической системой управления движения может осуществляться по циклограмме запуска

ракеты-носителя (РН), включающей динамические операции и операции системы управления разгонным блоком (СУ РБ) (таблица 1), в соответствии с графиком функционирования СУ РБ и проведении сеансов измерения измерительного комплекса космодрома (ИКК) (рис. 1) [2, 3].

Таким образом, функционирование СУ РБ при управлении работой маршевой двигательной установки (МДУ), включает следующие этапы:

- определение и оценка текущего вектора состояния объекта управления – расчёт по сигналам космической навигационной системы (КНС) «ГЛОНАСС»;
- расчет действительных параметров орбиты РБ с КА и их отклонения от заданных в полётном задании;
- *выработка оптимального управляющего воздействия* – пересчёт и коррекции полётного задания бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ РБ);
- *реализация управляющего воздействия* – программный разворот РБ и работа его МДУ по откорректированному полётному заданию;
- *определение и оценка текущего вектора состояния объекта управления.*

Теперь сформулируем задачу оптимального управления в целевом информационном пространстве. Общий вид целевого функционала [1] принимает вид:

$$F = T(H_n(D, t_H), H_k(D, t_k)) + \int_{T_H}^{T_k} J(u(R, t), h(D, t)) dt \rightarrow \min_u, \quad (1)$$

где:

- $T(\cdot)$ – терминант функционала;
- $H_H(\cdot)$ – начальная энтропия покрытия;
- $H_k(\cdot)$ – конечная энтропия покрытия;
- D – вектор обобщённых технических показателей РБ;
- T_H – начальное время;
- T_k – текущее время;
- $J(\cdot)$ – интегрант функционала;
- $u(\cdot)$ – функция управления ресурсами;

- $R(\cdot)$ – вектор ресурсов;
 $h(\cdot)$ – текущая энтропия покрытия.

Таблица 1

Операции СУ РБ и ИКК

Динамические операции	Обозначение	Расчетное время	Операции управления	
			СУ РБ	ИКК
—		-00.27.00 - 00.00.00	Набор стартовой готовности.	Прием исходного состояния бортовых систем
Контакт подъема	КП	00.00.00	—	Проведение ИТНП. Прием ТМИ. Контроль бортовых систем.
Отделение 1 ступени	КО1	00.02.06,2		
Сброс головного обтекателя	ГО	00.03.03,00		
Отделение 2 ступени	КО2	00.05.33,58		
Отделение РБ от РН	КО3	00.09.44,167		Вне ЗРВ ИКК
—		00.10.00-01.00.00	Проведение ИТНП. Получение параметров опорной орбиты. Расчет перезакладки установок 1-го включения МДУ РБ.	
Первое включение ДУ РБ	МД1	00.13.26,20	Управление работой МДУРБ.	
Первое выключение ДУ РБ	ГК1	01.20.32,81		
Программные развороты		01.25.00-02.59.00	Проведение ИТНП. Получение параметров переходной орбиты. Расчет перезакладки установок 2-го включения МДУ РБ.	Прием ТМИ. Контроль бортовых систем. Получение информации о первом включении МДУ (в записи).
Второе включение ДУ РБ	МД2	06.29.23,06	Управление работой МДУ РБ.	Прием ТМИ. Контроль бортовых систем. Контроль второго включения МДУ РБ. Контроль отделения КА.
Второе выключение ДУ РБ	ГК2	06.32.39,84		
Отделение КА		06.32.40,84	—	
Сброс давления из баллонов и баков. Увод РБ с целевой орбиты.		06.35.00-07.12.00		
Прием КА на управление ГИЦИУ КС. Ввод в состав ОГ.		06.32.40,84 -	Проведение ИТНП средствами СУ РБ КА ГИЦИУ КС. Получение параметров целевой орбиты. Прием ТМИ с КА. Контроль бортовых систем КА.	

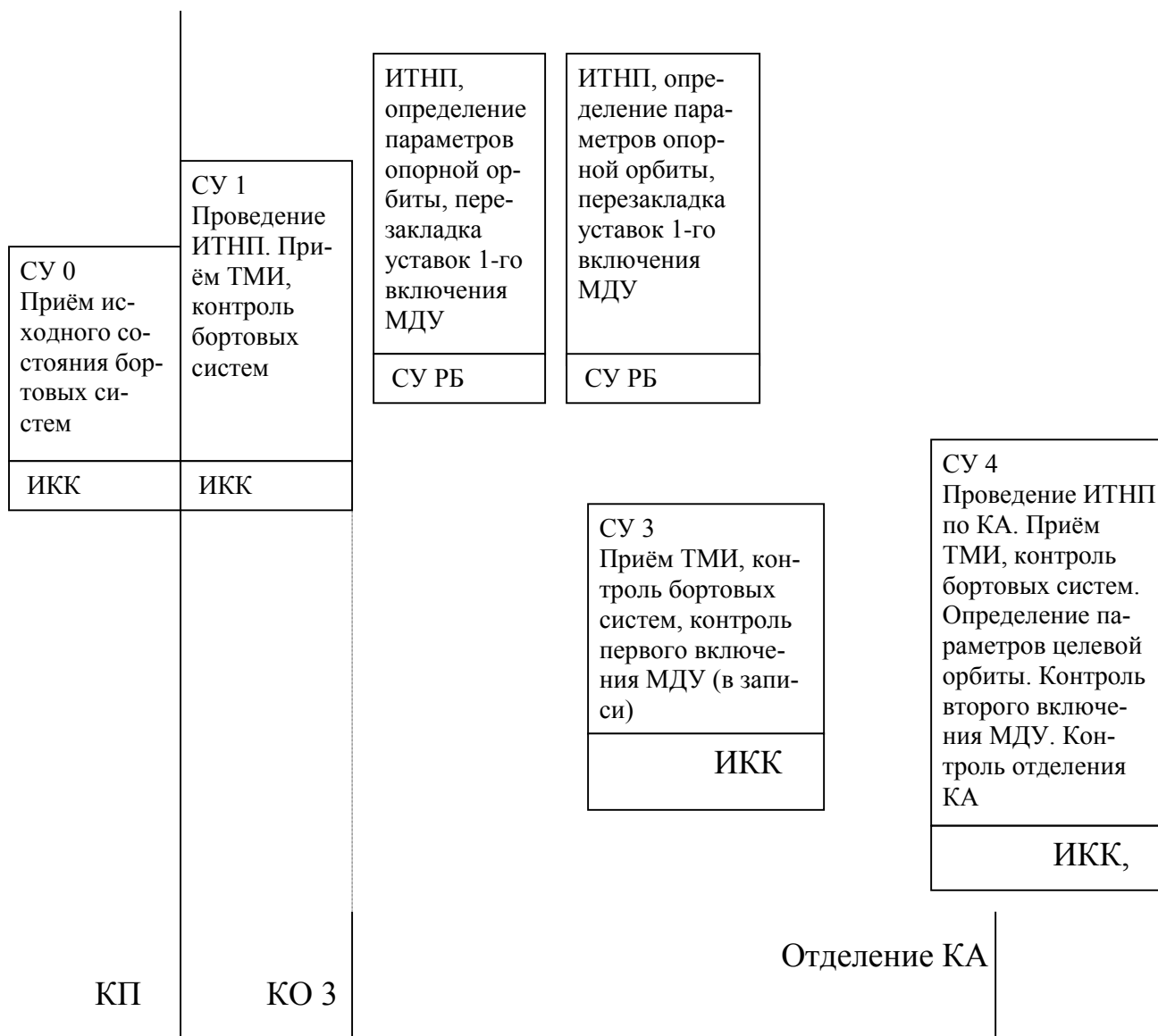


Рис. 1. График функционирования СУ РБ и сеансов измерений ИКК

Целевой функционал учитывает динамику информационных потоков объекта управления. Для разработки целевого функционала обосновано [1, 4, 5], что формирование управляющих воздействий должно проводиться в целевом информационном пространстве отношений, в то время как реальный обмен ресурсами происходит в предметной ресурсной области отношений. Такой подход позволяет оптимизировать систему управления с учётом решения главной целевой задачи и в то же время учитывать негативные процессы (возмущающие факторы) и формировать управляющие воздействия, максимально соответствующие потребностям объекта управления и подавляющие влияние деструктивных возмущающих факторов. Последующая реализация управляющих воздействий в предметной области отношений приводит к рациональному расходованию ресурсов.

Общий вид целевого функционала и система ограничений [1] для обеспечения функционирования элементов СУ СТК приводят задачу оптимального управления к вариационной задаче оптимального управления в понтрягинской форме.

Общая постановка задачи оптимального управления основывается на применении принципа максимума Понтрягина.

Определим целевой функционал [1]:

$$F = H_n(D, t_H) - H_n(D, t_k) + \int_{t_H}^{t_k} u^t(D, t) \cdot V \cdot h_{n/J}(D, t) dt \rightarrow \min_u, \quad (2)$$

где:

$h_{n/J}$ – вектор производной по времени от условной энтропии покрытия по J элементам, взаимодействующим с объектом управления;

$u^t(D, t)$ – вектор управляющих воздействий на информационные потоки от m взаимодействующих элементов;

V – матрица.

Уравнения ограничений для элементов СУ имеют следующий вид:

$$F_i = H_{Hi}^0(R, t_H) - H_{Ki}^0(R, t_K) + \int_{t_H}^{t_K} u_i^t(R, t) \cdot V_i \cdot h_{i/j}^0(R, t) \leq H_{\max i}, \quad (3)$$

где:

– матрица коэффициентов для i -го элемента СУ;

– вектор управляющих воздействий для i -го элемента СУ;

– производная условной обобщённой энтропии покрытия в отношениях i и j элементов СУ.

Для функции ограничения на управление используем область определения управляющих воздействий: $u_i \in [-1; 1], \forall i = 0, \dots, s$, где s – количество реализованных управляющих воздействий. Тогда выражение для ограничений по управлению имеет вид:

$$\sum_{i=1}^s u_i \leq s. \quad (4)$$

Выработка управляющих воздействий в соответствии с принципом максимума Понтрягина возможна на кусочно-непрерывных функциях. Поэтому для аналитического представления уравнений связи необходимо определить производные для энтропии покрытия в зависимости от управления.

Как указывалось выше, производная от энтропии покрытия (текущая энтропия) определяется корректно. Представим в скалярной записи её зависимость от ресурсов и управления. Для этого определим в качестве оптимальной оценки значения ресурса или показателя качества объекта значение R^* , доставляющее максимум апостериорной плотности вероятности распределения этой величины. Это значение зависит от реализации управляющих воздействий. Такие оценки, как показывают исследования, обладают хорошей устойчивостью [1, 4]. Энтропия покрытия представляет собой статистику для случайной величины (показатели или ресурсы), зависящую от плотности распределения случайной величины. Тогда справедливо:

$$\dot{H}_n(t) = k \frac{d(\log \left[\frac{|u m_r - r_{\min}|}{r_{\min}} \right])}{dt} = k u \frac{r_{\min}}{r_{\min} + |m_r - r_{\min}|} R^* . \quad (5)$$

Таким образом, выражение (5) представляет собой уравнение связи. В случае использования приведения к норме:

$$\left. \begin{aligned} a) \quad \| \{r_i\} \| &= \sqrt{\left(\sum_{i=1}^m (r_i) \right)^2} \\ б) \quad \| \{r_i\} \|_n &= \exp \left\{ \sum_{i=1}^m |r_i| \right\} \end{aligned} \right\} , \quad (6)$$

уравнения связи примут вид:

$$\dot{h}_n = k \sum_{i=0}^m u_i^t(R, t) V_i \dot{r}_i . \quad (7)$$

Составим функцию Лагранжа:

$$\Lambda = \int_{T_H}^{T_K} \left[\sum_{i=0}^m \lambda_i u_i^t(R, t) V_i h_{i/j}(R, t) + p^t(t) (\dot{h}(t) - k \sum_{i=0}^m u_i^t(R, t) V_i r_i) \right] dt + \sum_{i=0}^m \lambda_i (H_{ni}(T_H) - H_{ni}(T_K)) \quad (8)$$

где $p(t)$ – некоторая векторная кусочно-непрерывная функция, определяемая вместе с неопределёнными множителями Лагранжа λ_i .

В такой постановке задачи оптимального управления выполняются следующие условия:

а) стационарности по $h(t)$ (уравнения Эйлера), приводит к системе уравнений:

$$\begin{aligned} -\frac{d}{dt} \Lambda_{h_i} + \Lambda_{h_i} &= 0 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \dot{p}(t) &= \sum_{i=0}^m \lambda_i u_i^t(R, t) V_i - kp(t)u \end{aligned} \quad (9)$$

б) трансверсальности по h :

$$\Lambda_{h_i}(t_0) = H_{nh_i}(T_H) \Leftrightarrow p(T_H) = \lambda \quad (10)$$

в) оптимальности по u :

$$\begin{aligned} \min_{u \in U} \left[\sum_{i=0}^m \lambda_i u_i^t(R, t) V_i h_{i/j}(R, t) - p(t) k \sum_{i=0}^m r_i \right] &= \\ = \sum_{i=0}^m \lambda_i u_i^t(R, t) V_i h_{i/j}(R, t) - p(t) k \sum_{i=0}^m r_i u_i, \quad \forall t \in [T_H, T_K] \end{aligned} \quad (11)$$

г) стационарности по $[T_H, T_K]$ в случае подвижных концов временного отрезка интегрирования:

$$-\sum_{i=0}^m \lambda_i u_i^t(R, T_H) V_i h_{i/j}(R, T_H) + H_n(T_H) + \dot{H}_n(T_H) = 0 \quad (12)$$

$$\sum_{i=0}^m \lambda_i u_i^t(R, T_K) V_i h_{i/j}(R, T_K) + H_n(T_K) + \dot{H}_n(T_K) = 0 \quad (13)$$

д) дополняющей нежёсткости:

$$-H_{\max i} + \lambda_i \left[H_{Hi}^0(R, t_H) - H_{Ki}^0(R, t_K) + \int_{T_H}^{T_K} u_i'(R, t) V_i h_{i/j}^0(R, t) dt \right] = 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (14)$$

е) неотрицательности:

$$\lambda_i \geq 0. \quad (15)$$

Выражения (9) – (14) определяют систему уравнений большой размерности, которая определяется количеством элементов в системе управления, связями этих элементов и объекта управления. Количество ограничений (3) равно m (число элементов СУ). Каждый элемент СУ имеет вектор условной обобщённой энтропии покрытия с размерностью, равной его связям по каналам ресурсного обмена, следовательно, количество управляющих функций для одного элемента не превышает m . Таким образом, количество неизвестных составляет величину, не большую $(m+1)m + 1$. Количество уравнений, построенных на основе (9) – (15) в этом случае составляет $(m+1)m$. С целью её решения используется предположение $\lambda_0 = 0$ и если это не приводит к противоречию, то используется предположение $\lambda_0 = 1$. Для решения системы уравнений порядка m^2 потребуется порядка $2(m^2)^2 = 2m^4$ операций [4]. Для системы управления, включающей 20 элементов, что даже снижено для СУ СТК, потребуется около 160000 арифметических операций. Компьютер, даже не совсем современный, вполне может справиться с такой задачей, однако аналитически провести расчёт выражений для вычисления 400 переменных, проанализировав 160000 арифметических выражений, представляется слишком трудоёмкой задачей. В дальнейшем предлагается рассмотреть практическое применение принципа максимума Понтрягина для решения упрощённой задачи ресурсного обмена и рассмотреть возможные приближённые подходы.

Таким образом, проведен анализ циклограммы запуска РН при выведении КА на целевую орбиту, этапов функционирования системы управления РБ, математической модели описывающей выведение КА.

Реализация существующих циклограмм запуска КА при необходимости поддержания необходимого состава группировки КА, включая резервные, может становиться затруднительной в связи с присущими ей недостатками:

- дублирование операций, выполняемых СУ РБ, средствами центра управления полетами КА и ИКК космодрома запуска;
- первое включение МДУ осуществляется вне СУ РБ без коррекции уставок полетного задания;

Одним из способов выполнения задач по развертыванию ОГ КА военного времени является применение РБ с автоматической системой управления движением.

Анализ предложенной циклограммы запуска КА с применением автоматической системой управления движением РБ позволил выявить этапы функционирования системы при управлении ДУ РБ. Основными этапами являются:

- определение и оценка текущего вектора состояния объекта управления является расчет действительных параметров орбиты РБ с КА и их отклонения от заданных в полетном задании;
- выработка оптимального управляющего воздействия – расчет и коррекции полётного задания бортового вычислительного комплекса РБ;
- реализация управляющего воздействия – программный разворот РБ и работа МДУ по откорректированному полетному заданию;
- определение и оценка текущего вектора состояния объекта управления после реализации управляющего воздействия.

При анализе математической модели выведения КА, применяя метод импульсной аппроксимации, можно получить системы уравнений, описывающих переход РБ с КА с известной опорной на требуемую целевую орбиту. Полученные системы уравнений имеют бесконечное множество решений и позволяют осуществить оптимизацию по величине характеристической скорости a , следовательно, и расхода топлива.

Литература:

1. Сухов А.В. Динамика информационных потоков в системе управления сложным техническим комплексом // Теория и системы управления, 2000. – № 4. – С. 111-120.
2. Небылов А.В. Гарантирование точности управления. – М.: Наука, Физматлит, 1998. – 304 с.
3. Иванов Н.М. Баллистика и навигация космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1986. – 296 с.
4. Бурый А.С., Сухов А.В. Оптимальное управление сложным техническим комплексом в информационном пространстве // Автоматика и телемеханика, 2002. – № 7. – С. 25-37.
5. Бурый А.С., Фомичев И.Д. Мультиагентные модели управления группами автономных летательных аппаратов [Электронный ресурс] // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования: Научный интернет-журнал. 2013. – № 2 (12). Режим доступа http://iea.gostinfo.ru/files/2013_02/2013_02_06.pdf

© П.А. Сухов, 2013