

УДК 629.7

Статистическое исследование точности выведения космического аппарата на заданную орбиту

Эфендиева Айна Ариф кызы^(*)

efendieva@bmstu.ru

Бочаров Михаил Викторович

m.botcharov@yandex.ru

Шатский Михаил Александрович

msh@bmstu.ru

МОКБ «Марс» — филиал ФГУП «ВНИИА», Москва, Россия

Аннотация. Предложена методика априорного подтверждения вероятности успешного выведения космического аппарата (КА) на целевую орбиту по критерию точности управления с помощью статистических испытаний алгоритма терминального управления (АТУ). Определено необходимое количество испытаний. Определены вероятностные характеристики распределения отклонений контролируемых параметров. С помощью модифицированного комплексного метода Бокса проведена оценка максимальных отклонений вектора состояния космического буксира (КБ). Сформировано правило проверки гипотезы об успешности выведения.

Ключевые слова: космический буксир, точность выведения, комплексный метод Бокса, определение вероятности успешного выведения, статистические испытания

Введение. Требуемая точность выведения КА на заданную орбиту с помощью КБ с малой тяговооруженностью может быть получена только при использовании АТУ [1]. Одним из основных требований к АТУ является необходимость априорного подтверждения успешности выведения КА по критерию точности управления с заданной вероятностью $P_{\text{доп}}$ и заданной доверительной вероятностью $P_{\text{дов}}$.

Материалы и методы; результаты. Подтверждение указанного требования может быть получено лишь проведением статистических испытаний АТУ, включающих определенное число реализаций. Считается, что АТУ удовлетворяет требованию точности, если по результатам моделирования с заданной доверительной вероятностью $P_{\text{дов}}$ подтверждена статистическая гипотеза:

$$P_{\text{усп}} > P_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{усп}}$ — вероятность успешного выведения по критерию точности.

Метод статистических испытаний предполагает проведение значительно-го числа испытаний, что требует больших затрат времени и делает актуальным обоснование минимального количества испытаний N_{min} . Величина N_{min} для проверки гипотезы (1) определяется для случая, когда априори известно, что $P_{\text{усп}} = P_{\text{доп}}$, и лишь с вероятностью $1 - P_{\text{дов}}$ может наблюдаться хотя бы одна «неуспешная» реализация. Функция распределения числа m «неуспеш-

ных» реализаций в n независимых испытаниях соответствует биномиальному закону [2, с. 61], который при малых оцениваемых вероятностях ($1 - P_{\text{усп}} < 0,1$) аппроксимируется законом Пуассона. Тогда [2]:

$$N \frac{\ln(1-P_{\text{дов}})}{1-P_{\text{доп}}} \min.$$

После проведения N_{min} испытаний АТУ для оценки точности вывода КА рассчитываются вероятностные характеристики распределения отклонений параметров орбиты от требуемых значений. С помощью модифицированного комплексного метода Бокса, учитывающего случаи локальных невыпуклостей минимизируемой функции [3], определяются оценки максимальных отклонений радиус-вектора и вектора скорости КБ.

Так как в случае $P_0 < P_{\text{усп}} < P_1$ решение о справедливости гипотезы (1) можно принять только с вероятностью $P_{\text{дов}}$ меньше заданной [4], сформулировано следующее правило проверки:

$$\begin{aligned} t < t^* &\rightarrow \gamma_0: Q < Q_{\text{доп}} \begin{cases} \beta < \beta_{\text{доп}} \leftarrow t \leq t_0 \\ \min \beta \leftarrow t_0 < t < t^* \end{cases}; \\ t > t^* &\rightarrow \gamma_1: Q > Q_{\text{доп}} \begin{cases} \alpha < \alpha_{\text{доп}} \leftarrow t \geq t_1 \\ \min \alpha \leftarrow t^* \leq t \leq t_1 \end{cases}; \\ \alpha_{\text{доп}} = \beta_{\text{доп}} &= 1 - P_{\text{дов}}; Q = 1 - P_{\text{усп}}, Q_{\text{доп}} = 1 - P_{\text{доп}}, \end{aligned}$$

где t — число «неуспешных» реализаций; t_0 и t_1 — его нижнее и верхнее пороговое значение; t^* — браковочное число; γ_0, γ_1 — решения принять и отклонить гипотезу; α и β — вероятности ошибок первого и второго рода.

Заключение. Исследована точность вывода КА на заданную орбиту методом статистического моделирования. Определено минимальное количество испытаний и сформулировано правило проверки гипотезы (1). Описанная выше методика априорного подтверждения вероятности успешного вывода КА реализована в программном комплексе статистического моделирования управляемого движения КБ, включающий стенд математического моделирования с реализованным АТУ и базу данных для записи результатов реализаций.

Список источников

- [1] Андреев В.П., Бонк Р.И., Бровкин А.Г. *Система управления разгонным блоком*. Москва, Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010, 272 с.
- [2] Вентцель Е.С. *Теория вероятностей*. Москва, Высшая школа, 2006, 575 с.
- [3] Савин А.Н. Параллельный вариант алгоритма условной оптимизации комплексным методом Бокса. *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика*, 2012, т. 12, вып. 3, с. 109–117.
- [4] Ллойд Э., Ледерман У. *Справочник по прикладной статистике. Т. 2*. Москва, Финансы и статистика, 1990.