

Н. Ф. АВЕРКИЕВ, В. В. САЛОВ, А. Т. ЖАТКИН, В. В. КИСЕЛЕВ

МОДИФИКАЦИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Рассматривается задача синтеза баллистической структуры орбитальной группировки космических аппаратов как задача оптимального управления динамической системой. Задача формализована и сведена к традиционной постановке задачи оптимального управления динамической системой со свободным правым концом.

Ключевые слова: синтез баллистической структуры, задача оптимального управления динамической системой, показатель эффективности.

Орбитальные группировки космических аппаратов (ОГ КА) проектируются для решения целевой задачи — обеспечения лиц, принимающих решения (потребителей), космической информацией. Космические аппараты и системы КА, принадлежащие соответствующим орбитальным группировкам, входят наряду с этим в состав космических систем (КС), что обуславливает необходимость решения задач с требуемой оперативностью. При этом сбор и передача информации осуществляется с поверхности Земли (или ограниченной ее части). Общность решаемых задач, однако, не позволяет обосновать выбор единого показателя эффективности функционирования, которым является мера соответствия ожидаемых результатов поставленным задачам, и, кроме того, не удастся с общих позиций описать такие операционные свойства, как результативность, ресурсоемкость и оперативность. Если учесть, что космические системы являются в настоящее время обеспечивающими, то, на первый взгляд, целесообразно показателем эффективности считать вероятность выполнения задачи потребителем. Но в этом случае необходимо будет учитывать разнородный состав потребителей и многообразие решаемых ими задач, что само по себе является сложной проблемой. Кроме того, это приведет к необходимости учета факторов, определяющих условия функционирования потребителей, которые могут стать решающими, и выбранный показатель эффективности окажется слабо зависящим от структуры и характеристик КС. Тем не менее, существенное влияние на показатели эффективности функционирования орбитальной группировки КА оказывает ее баллистическая структура, под которой понимается количество КА и их взаимное расположение в космическом пространстве. При решении задач проектирования баллистических структур ОГ КА на практике используются различные показатели эффективности, которые выбираются исходя из непосредственно стоящих перед КС задач [1]. Такими показателями могут служить количество решаемых орбитальной группировкой КА целевых задач для обеспечения потребителей космической информацией в течение определенного (планируемого) интервала времени, потенциальные возможности ОГ КА по решению целевых задач в любой текущий момент времени и др.

Предположим, что орбитальная группировка состоит из m КА и движение j -го КА описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$\dot{x}_j = f_j(x_j, u_j, t), \quad (1)$$

где $x_j \in X$ — параметры движения j -го КА, X — множество допустимых параметров движения; $u_j \in U$ — вектор управления j -м КА, U — множество допустимых управлений; $t \in [t_0, t_k]$ — текущее время, t_0 — время начала формирования ОГ КА, t_k — планируемое время окончания выполнения орбитальной группировкой целевой задачи; функции

$f_j(x_j, u_j, t)$, $j = \overline{1, m}$, непрерывны по совокупности параметров x_j и u_j , непрерывно дифференцируемы по x_j , функции $u_j(t)$ измеримы и ограниченные.

Решение системы (1) однозначно определяет траекторию движения объекта $x_j(t)$, которая называется фазовой.

Пусть известны начальные условия для дифференциальных уравнений (1), соответствующие времени начала формирования ОГ КА:

$$x_j(t_0) = x_{j0}, \quad \dot{x}_j(t_0) = \dot{x}_{j0}. \quad (2)$$

Разобьем временной интервал $[t_0, t_k]$, на котором рассматривается движение КА, на следующие интервалы:

$$[t_0, t_k] = [t_0, t_q) \cup [t_q, t_k], \quad (3)$$

где t_q — „время Ч“: планируемое время готовности ОГ КА к выполнению целевой задачи.

Введем в рассмотрение обобщенный показатель, характеризующий потенциальные возможности ОГ КА по решению целевой задачи в текущий момент времени $t \in [t_q, t_k]$:

$$w = w(C, D, E, t), \quad (4)$$

где C — матрица параметров движения m КА на момент времени t ; D — матрица параметров, характеризующих работу бортовой специальной аппаратуры m КА на момент времени t ; E — матрица параметров (размеры, координаты и др.), характеризующих, на момент времени t , обслуживаемую область поверхности Земли и потребителей космической информации.

Зададим следующее правило расчета показателя (4):

$$w = \begin{cases} 1, & \text{если } R_i(C, D, E, t) \leq R_i^{\text{п}} \text{ для всех } i = \overline{1, n}; \\ 0, & \text{если } R_i(C, D, E, t) > R_i^{\text{п}} \text{ для некоторого } i = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (5)$$

где R_i — величина i -го признака потенциальной возможности выполнения орбитальной группировки КА целевой задачи; n — количество признаков; $R_i^{\text{п}}$ — пороговое значение i -го признака.

Функция (5) позволяет определить временные интервалы, на которых обеспечивается требуемое качество решения целевой задачи ОГ КА заданной баллистической структуры.

Для заданных значений t_q и t_k можно проинтегрировать выражение (5) по времени t :

$$W = \int_{t_q}^{t_k} w(C, D, E, t) dt, \quad (6)$$

и получить значение, определяющее суммарное время, в течение которого целевая задача может быть успешно решена. При этом баллистическая структура ОГ КА полностью определяется матрицей параметров движения C на момент времени t_q .

Временной интервал $[t_0, t_q)$, вместе с ресурсом управления, задаваемым как $u_j(t) \in U$, $j = \overline{1, m}$, $t \in [t_0, t_q)$, определяет ресурс на перестроение ОГ КА (на изменение баллистической структуры, определяемой матрицей C на момент времени t_0) в целях повышения значения показателя (6) до требуемого уровня.

В этой связи имеет место следующая задача, формулируемая как задача оптимального управления динамической системой со свободным правым концом: найти для дифференциальных связей (1) и начальных условий (2) такое управление $u_j(t) \in U$, $j = \overline{1, m}$, $t \in [t_0, t_q)$, космическими аппаратами на интервале времени $[t_0, t_q)$ при ограничениях на фазовую траекторию $x_j \in X$, ко-

торое позволит создать баллистическую структуру ОГ КА, определяемую матрицей $C(t_q)$ параметров движения КА на момент времени t_q и доставляющую максимум интегралу (6).

При более детальном рассмотрении временного интервала $[t_q, t_k]$, на котором осуществляется обеспечение потребителей космической информацией, можно выделить временные области, где ценность информации для потребителя различна. Например, при планировании и проведении войсковых операций ценность космической информации, поступающей от ОГ КА разведки, связи, навигации и др., меняется, поэтому данный фактор необходимо учитывать. В связи с изменением ценности информации во времени правила расчета показателя w также изменятся — значение w будет зависеть от времени $t \in [t_q, t_k]$, т.е.

$$w = \begin{cases} b(t), & \text{если } R_i(C, D, E, t) \leq R_i^{\text{п}} \text{ для всех } i = \overline{1, n}, \\ 0, & \text{если } R_i(C, D, E, t) > R_i^{\text{п}} \text{ для некоторого } i = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (7)$$

где $b(t) \in [0; 1]$ — безразмерный коэффициент ценности космической информации, задаваемый эвристическим путем или с помощью экспертов.

В результате при расчете значения функционала (6) будет учитываться изменяющееся во времени значение коэффициента ценности космической информации.

Таким образом, задача проектирования баллистической структуры орбитальной группировки КА сведена к традиционной постановке задачи оптимального управления динамической системой со свободным правым концом, методы решения которой известны [2—4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверкиев Н. Ф., Васьков С. А., Салов В. В. Баллистическое построение систем космических аппаратов связи и пассивной радиолокации лунной поверхности // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 12. С. 66—73.
2. Малые космические аппараты информационного обеспечения / В. В. Фатеев, В. Н. Лагуткин, Ю. В. Слынько и др. М.: Радиотехника, 2010. 314 с.
3. Аверкиев Н. Ф., Булекбаев Д. А. Метод поиска оптимальной программы движения ракет-носителей для минимизации площади рассеивания отделяемых частей // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 7. С. 10—12.
4. Федоренко Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1978. 486 с.

Сведения об авторах

- Николай Федорович Аверкиев** — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полетов летательных аппаратов, Санкт-Петербург; E-mail: averkievnf@yandex.ru
- Вячеслав Викторович Салов** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полетов летательных аппаратов, Санкт-Петербург
- Александр Тимофеевич Жаткин** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полетов летательных аппаратов, Санкт-Петербург
- Вячеслав Владимирович Киселев** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полетов летательных аппаратов, Санкт-Петербург; E-mail: kiselev24.07.86@mail.ru

Рекомендована кафедрой
навигационно-баллистического обеспечения
применения космических средств и теории полетов
летательных аппаратов

Поступила в редакцию
18.02.14 г.