

УДК 629.78

Основные принципы автоматизированного планирования полёта автоматических космических аппаратов

О.К. Жигастова, В.Н. Почукаев

В статье приведены основные принципы построения методики автоматизированного планирования полёта автоматических космических аппаратов (КА). Рассмотрены три вида плана, два из которых являются исходными для составления основного вида плана – плана полёта, используемого для управления автоматическим КА. Рассматривается структура плана и составляющие его элементы. Раскрывается процедура составления плана, базирующаяся на причинно-следственных отношениях. Формулируется алгоритм построения плана полёта автоматизированным способом.

Ключевые слова: космический аппарат; план полёта; команды управления; целевые фрагменты; причинно-следственные отношения; таблицы отношений

В настоящей статье рассматриваются два принципиальных положения, которые могут быть положены в основу методики автоматизированного планирования полёта автоматических КА. Основным критерием, определяющим процедуру составления плана полёта автоматизированным способом, являются целевые функции, позволяющие представить задачи, поставленные перед КА, в виде вектора, определённого на множестве его пространственно-временных состояний.

Под пространственно-временным состоянием КА понимается значение координат и

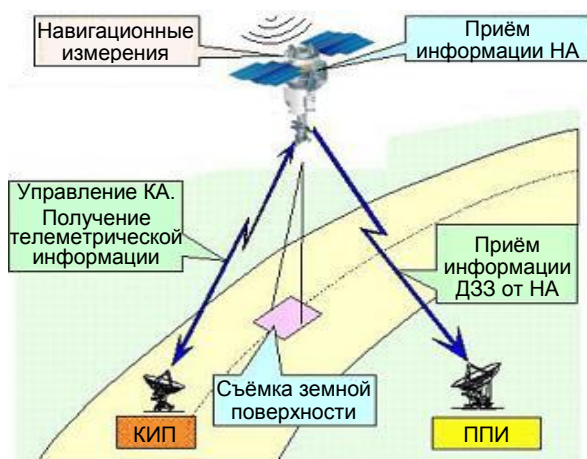


Рис. 1. Процедура управления автоматическим КА «Ресурс-ДК1» [2]

скорости КА, его угловое положение в пространстве и вектор угловой скорости, а также угловое положение навесного оборудования КА, к которому может относиться и целевая аппаратура, установленная на подвижных платформах [1].

Большинство автоматических аппаратов относится к классу КА,

обеспечивающих решение именно пространственно-временных задач. В частности, все множество КА дистанционного зондирования Земли удовлетворяют данному условию. На рис. 1 приведён пример функционирования КА «Ресурс-ДК1», обеспечивающего решение задачи многозонального дистанционного зондирования земной поверхности в видимом диапазоне спектра [2].

Для автоматических КА, удовлетворяющих указанному требованию, выполняется важное условие, состоящее в следующем. Все цели, которые поставлены перед этими КА, достигаются за счет управления их пространственно-временным состоянием. А это означает, что данные КА можно рассматривать как транспортные средства, на которых установлена целевая аппаратура. Задача этого средства состоит в доставке целевой аппаратуры в заданную точку пространства в требуемое время, обеспечение требуемой ориентации и вектора угловой скорости, включение целевой аппаратуры и поддержание требуемого пространственно-временного состояния на всем интервале работы целевой аппаратуры. К этой же задаче относится и задача фиксации пространственно-временного состояния при наступлении определенных пространственно-временных событий.

В соответствии с необходимостью решения сформулированных задач организуется такое функционирование автоматического КА, которое обеспечит выполнение всех требуемых пространственно-временных условий. Данное требование реализуется за счет трех видов планирования, включающих:

- 1) планирование работы целевой аппаратуры;
- 2) планирование пространственно-временной деятельности;
- 3) планирование полёта, включающего работу служебных систем и объединяющего задачи первых двух видов планов (этот вид плана часто называют планом полета).

В дальнейшем представленные виды планов будем называть соответственно планом №1, планом №2, планом №3.

Под планированием пространственно-временной деятельности понимаются следующие операции, выполняемые на КА: проведение коррекций и маневров орбит КА, создание заданного значения вектора угловой скорости, требуемая ориентация навесного оборудования относительно корпуса КА, а также фиксация пространственно-временного состояния КА на момент наступления некоторых событий.

Между всеми видами приведенных планов существуют отношения, указанные на рис.2.

План пространственно-временных действий составляется на основании требований, указанных в плане работы целевой аппаратуры. Он формируется на основании данных, полученных из плана работы целевой аппаратуры.

План полета определяет такую программу работы всех элементов КА, реализация которой обеспечит выполнение условий, сформулированных в планах №1 и №2.

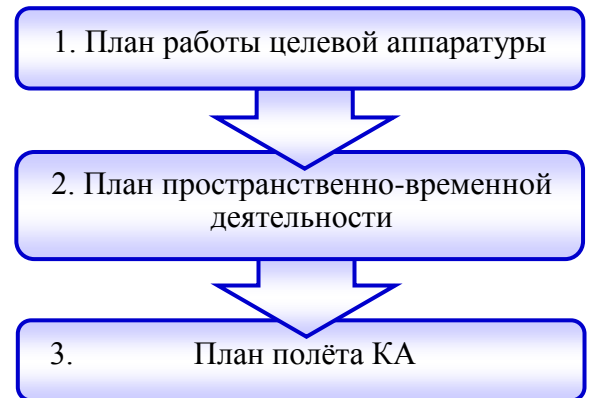


Рис.2. Схема взаимодействия планов

Для более четкого определения принципов автоматизированного планирования полета автоматических КА рассмотрим более подробно структуру плана полёта и составляющие его структурные элементы.

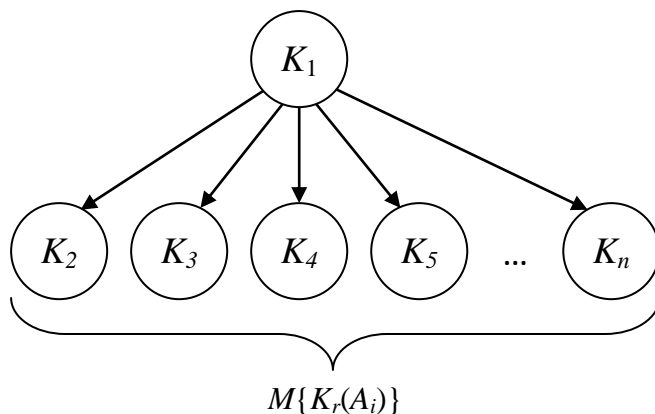
Пусть n есть число элементов КА, обозначаемых A_i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$, которые могут активизироваться командами, стоящими в плане полета, и совершать соответствующие действия. Для каждого элемента, как правило, существует некоторое количество команд, включающих команды, обеспечивающие его активизацию, определение режимов его работы, тестирование работоспособности элемента и деактивацию.

Обозначим множество команд, соответствующих элементу A_i , через $M\{K_r(A_i) / r = 1, 2, 3, \dots, n\}$. При функционировании элемента КА в одном из режимов им выполняется некоторое действие, которое будем обозначать символом $d(K_r(A_i))$, где K_r – команда, определяющая режим работы соответствующего элемента КА. Таким образом, множеству элементов КА $M\{A_i / i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ можно поставить в соответствие множество команд $M\{K_{r_i}(A_i) / i = 1, 2, \dots, n, r_i = 1, 2, 3, \dots, p_i\}$, которым в свою очередь можно поставить в соответствие множество действий, которые могут совершить элементы КА. Обозначим это множество через $M\{d(K_{r_i}(A_i)) / i = 1, 2, \dots, n, r_i = 1, 2, 3, \dots, p_i\}$. Очевидно, что между множеством команд и множеством действий, выполняемых элементами КА, можно установить взаимно-однозначное соответствие, если под режимом работы элемента подразумевать все виды воздействий, реализуемых с помощью команд, подаваемых на элемент.

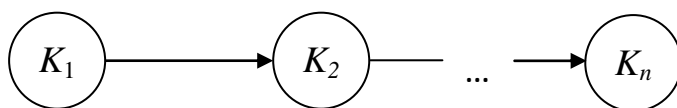
Под планом полета будем понимать цепочку, составленную из последовательности команд, удовлетворяющих совокупности условий, касающихся места размещения команды в цепочке, а также времени выдачи команды на исполнение. Целенаправленное функционирование КА, обеспечивающее решение всех задач, поставленных перед ним, обеспечивается реализацией плана № 3. В дальнейшем в статье будет рассматриваться только этот вид плана – план полета.

Рассмотрим, каким образом из всего множества команд $M\{K_{ri}(A_i) / i = 1, 2, \dots, n, r_i = 1, 2, 3, \dots, p_i\}$ может быть построен указанный план, реализация которого может привести к достижению всех целей, поставленных перед КА.

Между различными действиями, а значит и командами, входящими во множество действий и команд для любого КА, существуют причинно-следственные отношения. Суть этих отношений состоит в следующем. Будем считать, что если между действием $d_1(K_r(A_i))$ и $d_2(K_r(A_i))$ существует причинно-следственное отношение, и если действие $d_1(K_r(A_i))$ не может быть реализовано, если не реализовано действие $d_2(K_r(A_i))$, то подобную ситуацию следует



а) граф отношений между командой K_1 и множеством команд $M\{K_r(A_i)\}$



б) граф отношений между двумя соседними командами K_1, K_2 и K_n

Рис. 3. Графы отношений между командами

определить как зависимость выполнения первого действия от того, как будет выполнено или не выполнено второе действие. Первое действие будем называть зависимым, а второе – определяющим. В силу наличия взаимно-обратных отношений между действиями и командами, можно считать, что между элементами множества $M\{K_{ri}(A_i) / i = 1, 2, \dots, n, r_i = 1, 2, 3, \dots, p_i\}$ существуют такие же причинно-следственные отношения.

Причинно-следственные

отношения между командами и между действиями можно изобразить в виде

графа. На рис. 3 приведён пример таких отношений для некоторой условной совокупности команд и для простого случая отношений между двумя соседними командами.

Причинно-следственные отношения между командами можно задать в виде таблиц отношений, где в первом столбце одной строки записываются зависимые команды, а в другом столбце той же строки – определяющие команды. Если подобные таблицы составлены для всего множества отношений, то их можно использовать для составления фрагментов плана, представляющих собой цепочку команд, в которой каждая последующая команда является зависимой от предыдущей команды.

Примеры таблиц причинно-следственных отношений между командами для простого случая отношений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Простые причинно-следственные отношения

№ п/п	Зависимые команды	Определяющие команды
1	$K_1(A_i)$	$K_2(A_i)$
2	$K_2(A_i)$	$K_3(A_i)$
...		
n	$K_{n-1}(A_i)$	$K_n(A_i)$

Таким образом, используя причинно-следственные отношения между командами множества $M\{K_{r_i}(A_i) / i = 1, 2, \dots, n, r_i = 1, 2, 3, \dots, p_i\}$, можно определить сами команды, а также порядок следования команд во фрагменте плана, который определяет последовательность их реализации.

Подобная процедура составления фрагментов плана алгоритмизируется, а значит, может быть использована при составлении плана полёта автоматизированным способом.

Помимо определения порядка следования команд во фрагменте плана необходимо определить алгоритм расчета моментов времени выполнения команд.

Время выполнения каждой команды последовательности отсчитывается от некоторого фиксированного момента времени, называемого узловой точкой отсчета. В большинстве случаев узловая точка совпадает с моментом наступления некоторого пространственно-временного события.

Интервалы времени между соседними командами рассчитываются с помощью некоторых алгоритмов. В большинстве случаев этот алгоритм можно свести к заданию некоторого интервала времени Δt_i , величина которого может быть как постоянной, так и переменной.

Если известен момент реализации i -ой команды фрагмента t_i , то момент реализации $i+1$ команды будет отсчитан от момента t_i на величину времени работы i -ого элемента, активизированного i -ой командой, с добавлением величины $\Delta t_{i,i+1}$. Если величина $\Delta t_{i,i+1}$

постоянна для всех значений Δt , то временной интервал между моментом окончания работы i -ого элемента и выдачей команды на включение последующего элемента один и тот же для всех команд последовательности.

Рассмотрим теперь алгоритм составления плана полета. Он состоит из двух этапов:

- составление целевых фрагментов;
- сложение всех целевых фрагментов в единый план полета.

Под целевым фрагментом плана полета будем понимать фрагмент, удовлетворяющий следующим условиям.

Последняя команда целевого фрагмента K_m , воздействуя на элемент A_{in} , порождает действие $d(K_m(A_{in}))$, имеющее причинно-следственную связь с одним из пространственно-временных действий, входящим в план №2. При этом действие $d(K_m(A_{in}))$ выступает в этом отношении как определяющее действие, а соответствующее ему пространственно-временное действие – как зависимое.

Элемент A_{il} , на который воздействует первая команда фрагмента, начинает функционировать сразу же после его активизации, не требуя никаких дополнительных команд. Таким образом, первая команда фрагмента относится к разряду активизирующих команд.

Рядовые команды фрагмента (не первая и не последняя) удовлетворяют обычным требованиям произвольного фрагмента плана полёта. Указанная структура целевого фрагмента позволяет реализовать следующий алгоритм построения плана:

1. Из плана №2 выбирается одно пространственно-временное действие, которое необходимо реализовать на КА.
2. Из таблицы отношений, в которой данное действие представляется в качестве зависимого, выбирается первая команда последовательности.
3. Далее выполняется следующая совокупность стандартных операций:
 - выбирается последняя из уже построенной части фрагмента команда;
 - с помощью таблицы отношений находится команда, которая по отношению к данной команде является определяющей, и ставится вслед за ней, при этом момент

выполнения этой команды определяется по алгоритму, принятому для выполняемого фрагмента;

- найденная команда становится последней, номер которой в порядке следования команд возрастает на одну команду в этой части фрагмента;
- данная последовательность операций повторяется до тех пор, пока очередная выбранная команда не будет удовлетворять требованиям, предъявляемым к первой команде последовательности.

На этом заканчивается построение целевого фрагмента.

Рассмотренные целевые фрагменты строятся для каждого пространственно-временного действия плана №2.

В результате выполнения данного алгоритма образуется множество целевых фрагментов, количество которых равно числу действий, вошедших в план №2. Обозначим данное множество фрагментов следующим образом: $M\{\Phi_i / i = 1, 2, 3, \dots, l\}$, где l – количество действий, входящих в план №2.

Рассмотренная процедура построения целевых фрагментов плана полёта приводится здесь с целью показать, какова структура таких фрагментов. На практике данную процедуру можно значительно упростить, если заранее на этапе подготовки определить множество целевых фрагментов для заданного типа автоматического КА, соответствующих возможному пространственно-временному действию, которое может входить в план №2. В этом случае для каждого действия плана №2 можно сразу определить множество всех целевых фрагментов плана полёта. Подобная возможность появляется для всех автоматических КА с ограниченным количеством решаемых ими задач и целевой аппаратуры, устанавливаемой на КА.

Следующий этап составления плана полета сводится к размещению всего множества целевых фрагментов на единой временной оси, обеспечивающей монотонный рост моментов времени, определяющих времена выдачи команд целевых фрагментов на исполнение.

Выводы

В статье приводятся два основных принципа, используемых при автоматизированном планировании полёта автоматических КА, включающих:

- принцип причинно-следственных отношений между действиями, выполняемыми элементами КА при его функционировании, а также между командами активизирующими элементы КА, выполняющие данные действия;
- методы расчёта продолжительности интервалов времени между моментами реализации соседних команд, входящих в план полёта.

Также в статье приводится краткое изложение алгоритма составления плана полёта, использующего данный принцип.

Библиографический список

1. Жигастова О.К., Почукаев В.Н. Ключевые операции системы управления полётами автоматических околоземных космических аппаратов // Вестник Московского авиационного института. – 2012. – №1.
2. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Соллогуб А.В., Макаров В.П. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии. – М.: Машиностроение, 2010. – 384 с.

Жигастова Ольга Константиновна, начальник группы ЦНИИмаш, соискатель Московского авиационного института (национального исследовательского университета), тел.: 8 (495) 513-51-15; e-mail: inolga-ok@yandex.ru

Почукаев Владимир Николаевич, главный научный сотрудник ЦНИИмашиностроения, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н., тел.: 8 (495) 513-53-36

