

Способ формирования комплексных заявок на применение средств наземного комплекса управления для проведения сеансов управления космическими аппаратами

А. Ю. Тиунов

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

vka@mil.ru

Аннотация. В статье рассматривается задача формирования комплексных заявок на проведение сеансов управления космическими аппаратами (КА) с использованием ограниченных ресурсов наземного комплекса управления (НКУ). Предлагается алгоритм построения оперативного плана (ОП), включающий этапы формирования полей ресурсов, планирования на уровне отдельных КА с использованием понятий технологической группы и макроопераций, а также координации планов на уровне группировки КА. Рассмотрены критерии оценки качества плана и процедура разрешения конфликтных ситуаций при распределении ограниченных ресурсов НКУ.

Ключевые слова: технологический цикл управления, технологическая операция управления, поле ресурсов, командно-измерительный пункт, оперативный план

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, управление орбитальными группировками КА представляет собой сложную задачу, требующую эффективного использования средств НКУ. Однако, с учетом ограниченности его ресурсов, необходимость оптимального распределения этих ресурсов для обеспечения надежного функционирования орбитальных группировок КА становится критически важной.

Эффективное планирование и оптимальное использование ресурсов НКУ являются ключевыми компонентами успешного выполнения целевых задач космической деятельности. Для решения данной проблемы предлагается методика формирования оперативного плана (ОП) применения средств НКУ, основанная на применении математического программирования и теории расписаний.

Использование математического программирования позволяет сформулировать задачу оптимизации распределения ресурсов НКУ как математическую модель, которая может быть решена с помощью соответствующих алгоритмов и методов. Теория расписаний в свою очередь предоставляет инструменты для эффективного планирования последовательности операций управления КА с учетом временных и ресурсных ограничений.

В данной работе будет предложена методика разработки оперативного плана применения средств НКУ, которая позволяет учитывать различные аспекты управления орбитальными группировками КА, включая

ограниченность ресурсов, требования к времени выполнения операций и целевые задачи космических программ. Предлагаемый подход имеет потенциал значительно улучшить эффективность управления космическими системами и обеспечить более надежное функционирование орбитальных группировок КА.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Формирование комплексной заявки на применение средств НКУ является основой формирования оперативного плана (ОП) применения средств НКУ для решения задач управления КА в процессе их летной эксплуатации [1, 2].

В основу метода оперативного планирования работы средств НКУ положен принцип математического программирования, суть которого заключается в представлении процесса применения средств НКУ как процесса реализации технологических циклов управления (ТЦУ) КА определенного типа, выполняемого на ограниченном поле ресурсов.

ТЦУ КА представляет собой повторяющуюся совокупность операций управления КА на определенном интервале времени, предусмотренную эксплуатационной документацией для нормально функционирующего КА и обеспечивающую решение КА целевых задач с требуемым качеством. Практически ТЦУ КА представляет собой совокупность типовых технологических операций управления (ТОУ), реализуемых средствами НКУ, расположенных на различных командно-измерительных пунктах (КИП) НКУ, на некотором временном интервале. Под полем ресурсов понимается множества, состоящие из элементов «виток – КИП – средство НКУ», которые формируются для каждого КА на основе зон радиовидимости (ЗРВ) и оснащены КИП средствами управления КА с учетом их текущего состояния.

При таком подходе решение задачи оперативного планирования работы средств НКУ сводится к выбору их бесконфликтного распределения по сеансам управления КА (с учетом режимов работы), при котором наилучшим образом обеспечивается целевое применение КА, а состав привлекаемых средств минимален. Математической основой формирования ОП применения средств НКУ является теория расписаний [3].

Обобщенная методика формирования оперативного плана (ОП) применения средств НКУ для решения задач управления принятой на управление системой (орбитальной группировкой) КА определенного типа представляется в виде следующих процедур:

1. формирование начальных полей ресурсов средств НКУ для каждого КА системы – выполняется исходя из принятого к реализации ТЦУ КА;
2. построение ОП применения средств НКУ на уровне одного КА – выполняется для каждого КА на поле выделенных ресурсов для принятого к реализации ТЦУ КА из множества заранее сформированных вариантов;
3. оперативное ОП применения средств НКУ на уровне системы КА – выполняется в результате координации ОП, построенных для отдельных КА, устранения конфликтных ситуаций между ними и распределения средств НКУ, ставших причинами конфликтных ситуаций, между полями ресурсов отдельных КА.

Начальное поле ресурсов формируется с учетом ЗРВ каждого КА, оснащенности каждого КИП средствами НКУ и Плана технического обслуживания и ремонта средств НКУ. Пригодность элемента «виток – КИП – средство НКУ» множества поля ресурсов к выполнению ТОУ, предусмотренных принятым к реализации ТЦУ КА оценивается с помощью коэффициента пригодности, определяемого выражением: $K_{II} = K_t K_\gamma K_R K_p$, где K_t , K_γ , K_R , K_p – нормированные к единице коэффициенты, учитывающие длительность ЗРВ для средств КИП, значение угла места на параметре, состав средств КИП и надежность их работы.

Коэффициент K_t пропорционален K_t времени нахождения КА в ЗРВ КИП, коэффициент K_γ пропорционален максимальному углу места КА при его прохождении в ЗРВ КИП, коэффициент K_R принимает единичное значение при наличии на КИП соответствующего средства НКУ и нулевое – в отсутствие, коэффициент K_p определяется надежностью средства НКУ и учитывает вероятность выполнения им задачи в условиях воздействия на него внешней среды. Конкретные характеристики для поиска коэффициентов K_t , и K_γ , а также значения коэффициентов K_R и оценки коэффициентов K_p для каждого типа КА рассчитываются заблаговременно на основе экспертных оценок и задаются на этапе формирования исходных данных, соответствующих реализуемому ТЦУ.

Оперативное планирование на уровне отдельного КА проводится в виде формирования ОП на поле выделенных ресурсов с учетом заданного (реализуемого) ТЦУ. При этом вводятся понятия технологической группы операций (ТГО) и технологической макрооперации (ТМО) управления КА. ТГО управления соответствует некоторой логически взаимосвязанной группе операций управления КА [4]. Если из множества операций $\{A\}_C$, составляющих ТЦУ КА, выделить подмножество $\{A\}_{CR} \subseteq \{A\}_C$ операций управления,

планируемых одновременно, то модель ТГО управления есть $C_r = \langle \{A\}_{CR}, r_{CR} \rangle$, $r_{CR} \subset r$, $C_r \subset C$, где r – отношение между операциями; C – модель ТЦУ КА. Под ТМО управления понимают объединение ТГО на временном интервале, на котором операции управления КА могут быть спланированы только из групп операций управления, а само объединение имеет смысл законченного этапа ТЦУ. Модель ТМО управления есть

$$C_m = \bigcup_{j=i}^k C_r, C_m \subset C.$$

После составления ТГО и ТМО проводится их ранжирование с помощью отношения строгого порядка по следующим правилам:

- ТГО, соответствующие разным ТМО, не следуют друг за другом, причем ТМО, планируемые на более «ранних» витках, имеют больший приоритет;
- ТГО располагаются в порядке убывания степени их важности.

Оперативное планирование проводится по возрастанию номеров ТГО, после чего в рамках каждой ТМО осуществляется композиция ТГО с целью максимального совмещения операций управления КА по виткам и расположению КИП.

Для скоординированного ОП выбирают такую комбинацию расположения КИП по виткам, которая удовлетворяет следующим условиям:

- расположена на интервале витков, отведенном для ТГО;
- соответствует одной из множества схем планирования данной ТГО;
- обладает максимальным из всех других возможных комбинаций показателей качества плана ТГО.

Показатель качества плана ТГО определяется следующим соотношением: $K_{TGO} = K_B K_{CX} \prod_i K_{Pi}$,

$i = \overline{1, N}$, где K_B – коэффициент, учитывающий относительную ценность выбора начального витка ТГО на отведенном интервале; K_{CX} – коэффициент, определяющий относительную ценность выбранной из множества, схемы планирования ТГО; K_{Pi} – коэффициент пригодности i -го КИП к проведению данной ТГО; N – число КИП. Конкретные значения коэффициентов K_B и K_{CX} задают на этапе формализации ТЦУ на основе экспертных оценок.

При композиции ОП отдельных ТГО в рамках ТМО управления на уровне отдельных КА используется алгоритм, обеспечивающий на конкретном витке повышение K_{Pi} при переходе из одной ТГО к другой для тех КИП, которые попали в предыдущий ОП. При оперативном планировании на уровне системы КА осуществляется поиск конфликтных ситуаций между ОП отдельных КА и распределяются средства НКУ, ставшие причиной конфликтов, между полями ресурсов отдельных КА.

Процедура распределения средств НКУ между полями ресурсов отдельных КА основывается на

понятиях идеального ОП и меры близости к идеальному. Оперативный план считается идеальным, если он сформирован на поле ресурсов, отличающемся от начального на некоторое множество, сводимое к нулю в процессе разрешения конфликтов. Мера близости плана к идеальному определяется выражением $\rho = K_v \sum_j n_j$,

где K_v – коэффициент, учитывающий относительную ценность ОП управления КА на заданные сутки, n_j – коэффициент, определяющий относительную ценность ОП применения j -го средства НКУ, принадлежащего множеству средств, удаленных из начального поля ресурсов. Коэффициент K_v зависит от приоритета данного КА и относительной ценности ТЦУ, в соответствии с которым формируется ОП управления КА на заданные сутки, а коэффициент n_j зависит от относительной ценности сеанса управления, выполняемого данным средством НКУ.

Процедура распределения средств НКУ между полями ресурсов отдельных КА при разрешении конфликтных ситуаций строится таким образом, чтобы обеспечить в конечном итоге равномерный ущерб для ОП каждого КА системы в результате удаления рассматриваемой совокупности средств из полей ресурсов отдельных КА.

Для практического подтверждения результатов, проведен эксперимент, целью которого являлась оценка эффективности алгоритма построения ОП через оптимизацию распределения ограниченных ресурсов НКУ. Результаты эксперимента представлены в табл. 1 и на рис. 1.

ТАБЛИЦА 1. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Параметр	Единица измерения	До внедрения алгоритма	После внедрения алгоритма	Изменение (%)
Общее время реакции на изменения условий эксплуатации КА	часы	12	6	-50
Среднее время планирования сеанса управления	минуты	60	30	-50
Количество ошибок, допущенных операторами-планировщиками	ошибки	20	5	-75
Использование ресурсов НКУ (процент загрузки)	%	90	75	-16.67
Количество операторов-планировщиков для управления КА	человек	10	7	-30
Количество операторов-планировщиков для управления КА	человек	10	7	-30

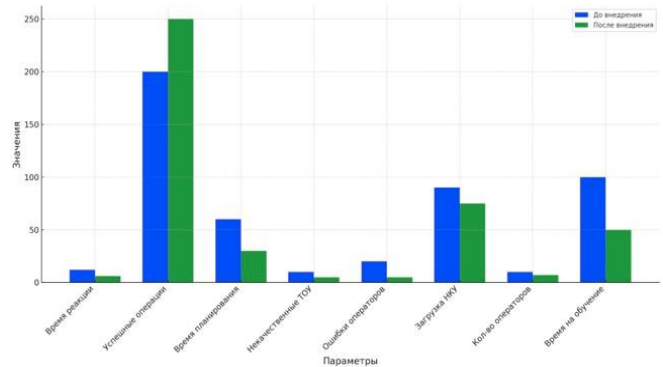


Рис. 1. Сравнение эффективности алгоритма

Использование разработанного метода и его практической реализации в автоматизированных системах организационно-технического управления позволяет:

- сократить число некачественных ТОУ на 9–10 %;
- повысить оперативность планирования по сравнению с «ручным» более чем на порядок;
- сократить число ошибок, допускаемыми операторами-планировщиками в 10–20 раз;
- сократить требуемые ресурсы НКУ для управления КА более чем в 2 раза;
- сократить число операторов-планировщиков.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход представляет собой инновационный метод оптимизации использования ограниченных ресурсов НКУ с целью более эффективного управления орбитальными группировками КА. Основанный на принципах теории расписаний и математического программирования, предлагаемый алгоритм построения ОП представляет собой интегрированный подход, включающий в себя последовательности ТОУ, объединенных ТГО и ТМО.

Важным моментом этого подхода является формализация процесса управления КА как последовательности операций, проводимых с учетом зон радиовидимости, требований к реализации технического управления и обеспечения заданных показателей эффективности. Такой подход позволяет оптимизировать распределение ресурсов НКУ, минимизируя временные и материальные затраты при обеспечении работы КА в соответствии с поставленными задачами.

В контексте практического применения, предложенные методы и алгоритмы могут найти широкое применение в автоматизированных системах планирования и оперативного управления космическими системами как гражданского, так и двойного назначения. Полученные результаты не только улучшают текущие процессы управления космическими программами, но и открывают перспективы для дальнейших исследований и разработок в данной области, способствуя развитию космической индустрии и национальных космических программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления [Электронный ресурс]: учебник / В.Н. Калинин, В.С. Гончаревский, Е.А. Новиков и др. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2022. 1 электрон. опт. диск.
- [2] Теоретические основы построения автоматизированной системы организационно-технического управления космическими средствами / В.В. Бетанов, А.С.Демидов, Г.Г. Ступак, А.Г. Янчик. М: ВА РВСН им. Петра Великого, 2002. 160 с.
- [3] Конвей Р.В., Максвел В.Л., Миллер Л.В. Теория расписаний: Пер. с англ. М.: Наука, 1975. 360 с.
- [4] Мануйлов Ю.С., Птушкин А.И., Стародубов В.А. Алгоритмическая и программная реализация гибкой стратегии управления космическими аппаратами. СПб.: МО РФ, 2005. 40 с.