Задача составления расписания действий экипажа Российского Сегмента Международной Космической Станции

Александр А. Лазарев Николай М. Орловский
Руслан Р. Садыков

18 марта 2014 г.

1 Введение

Управление таким сложным объектом, как Международная космическая станция (МКС), требует огромного количества различных человеческих и машинных ресурсов и состоит из комплекса мероприятий, включающего в себя: планирование функционирования объекта, обеспечение требуемого выполнения планов, сбор измерительной информации и ее контроль, моделирование возможных ситуаций, выработку управляющих команд, принятие решений по оперативной коррекции планов при возникновении нештатных ситуаций либо изменению условий ресурсного обеспечения.

Основными звеньями, участвующими в функционировании МКС, являются следующие три составляющие: наземный комплекс управления (НКУ), бортовой контур автоматического управления (БКАУ) и экипаж пилотируемой станции. Большинство задач и команд, которые требуется выполнить на борту орбитальной станции (ОС) при условии ее работы в штатном режиме, могут быть реализованы каждым из трех указанных звеньев, что обеспечивает требуемую надежность. Помимо упомянутых выше задач, некоторые работы выполнимы только экипажем. Особенно роль космонавтов возрастает при возникновении нештатных ситуаций.

Планирование занимает одно из центральных мест в структуре процесса управления. Задача планирования является одной из самых вы-

сокоприоритетных и имеет соответствующую сложность. Составление расписаний действий экипажа Российского сегмента (РС) МКС выполняется несколькими группами Центра управления полетами (ЦУП). Их задачей является своевременное и корректное распределение работ между космонавтами на заданный горизонт планирования. С каждым годом трудоемкость и сложность планирования действий экипажа РС МКС растет из-за присутствия следующих проблем:

- сложность и постоянное видоизменение объекта управления;
- возрастание сложности задач управления по причине роста количества требований и ограничений, связанного с увеличением числа контролируемых объектов;
- высокая стоимость ресурсов, обеспечивающих выполнение главной цели;
- частая необходимость перепланирования при дефиците времени в случае возникновения различных нештатных ситуаций;
- увеличение количества специалистов, участвующих в выполнении задач;
- анализ большого количества данных и учет ограничений при планировании новых работ.

Перечисленные моменты негативно влияют на оперативность и безопасность управления МКС. Для предупреждения возможных проблем в будущем, требуется уже сейчас сделать процесс планирования и перепланирования более быстрым, сохранив качество и корректность планов. Данная задача заключается в автоматизации процесса составления расписаний для экипажа. Это потребует, прежде всего, разработки специализированной математической модели и оригинальных алгоритмов, позволяющих автоматически распределять полетные операции между космонавтами. Решение такой задачи позволит:

- повысить качество планов за счет увеличения объема учитываемой информации и числа рассматриваемых вариантов;
- сохранить время операторов-планировщиков для решения других задач;

- оперативно, в короткие сроки совершать перепланирование в случае непредвиденных ситуаций.

Приведенные аргументы позволяют с уверенностью говорить об актуальности данной проблемы.

2 Постановка задачи

Опишем словесную постановку задачи планирования (или перепланирования) с горизонтом планирования один день. Горизонт планирования разбит на временные отрезки по 5 минут.

Имеется множество (или список) операций и экипаж, состоящий из нескольких космонавтов. Необходимо:

- выбрать подмножество операция для исполнения в течение горизонта планирования;
- распределить операции между космонавтами;
- определить для каждой операции момент начала ее исполнения (который должен совпадать с началом некоторого временного отрезка).

Также имеется множество ресурсов, необходимых для выполнения операций. Ресурсы могут быть двух типов: возобновляемые и невозобновляемые. Возобновляемые ресурсы используются во время исполнения операции и высвобождаются после ее окончания. Примером таких ресурсов могут быть приборы, линии связи и т.п. Невозобновляемые ресурсы не высвобождаются после окончания операции. Примером невозобновляемого ресурса является, например, энергия.

Каждая операция обладает следующими характеристиками.

- Приоритет (или важность) операции. Приоритетом может быть одно из нескольких значений, например: «обязательная к исполнению операция», «операция высокой важности», «операция средней важности», «обычная операция», «дополнительная операция».
- Время исполнения операции, которое известно точно. Время исполнения операции может зависеть от космонавта, который выполняет данную операцию.

- Временное окно исполнения операции: промежуток времени, когда операция может исполняться. Временное окно может состоять из нескольких промежутков времени, например, когда выполнение операции привязано к положению станции на орбите.

- Ресурсы, необходимые для выполнения операции и их количество.

- Показатель эффективности выполнения операции космонавтами. Задается значением в интервале $[0, 1]$. Нулевая эффективность означает невозможность выполнения операции космонавтом. Заметим, что эффективность выполнения операции может зависеть от времени суток, то есть времени начала выполнения операции.

При определении плана выполнения операций должны учитываться следующие ограничения.

- Каждый космонавт может выполнять только одну операцию в каждый момент времени.

- Для каждого невозобновляемого ресурса, его баланс в каждые момент времени должен быть положительным.

- Для каждого возобновляемого ресурса, его используемое количество в каждый момент времени не может превышать его объем.

- Между операциями могут существовать отношения предшествования обобщенного типа. Каждое такое отношение задается следующим образом: время начала выполнения операции должно быть больше (или меньше), чем время окончания другой операции плюс некоторое значение (которое может быть отрицательным). С помощью таких ограничений можно также описать одновременное выполнение операции несколькими космонавтами: в данном случае операция разбивается на несколько операций, время начала выполнения которых жестко привязано отношениями предшествования.

Для сравнения допустимых планов между собой предлагается два основных критерия.

1. Максимизация количество операций включенных в план. Здесь должен также учитываться приоритет операций. Это может быть сделано двумя способами. Первый способ заключается в «жестком»

соблюдении приоритетов: операция с меньшим приоритетом не может быть включена а план если операция с большим приоритетом туда не включена. Второй способ состоит в присвоении весов операциям в соответствии с их приоритетом, и в максимизации взвешенного числа включенных в план операций.

2. Максимизация суммарной эффективности выполнения операций включенных в план. Здесь также эффективность может быть скорректирована весами операций основанных на их приоритете.

Задача может быть сведена к однокритериальной путем «свертки» двух критериев с весовыми коэффициентами. Другой способ решения задачи состоит ее разбивке на два этапа: 1) сначала определяются операции включенные в план на основе первого критерия, 2) затем составляется наиболее эффективный план выполнения выбранных операций на основе второго критерия.

3 Данные

- I — множество космонавтов.
- J — множество операций (работ).
- $T = [t_{\min}, t_{\max})$ — горизонт планирования (разбит на временные отрезки по 5 минут). Все длительности в задаче кратны 5 минутам, единицей их измерения является количество временных отрезков.
- w_j, $j \in J$, — приоритет (вес) каждой операции, задается некоторым положительным числом, чем число больше, тем операция важнее.
- p_j, $j \in J$, — длительность каждой операции.
- T_j, $j \in J$, — множество моментов времени, когда каждая операция может начать выполняться, все моменты времени кратны 5 минутам.
- $E = \{e_{ijt}\}$ — (трехмерная) матрица эффективности выполнения. операций. $e_{ijt} \in [0, 1]$ — эффективность выполнения операций $j \in J$ космонавтом $i \in I$ начиная с момента времени $t \in T$. Нулевая эффективность означает невозможность выполнения операции. Заметим, что $e_{ijt} = 0$ если $t \notin T_j$.

- NR — множество невозобновляемых ресурсов.
- $B = \{b_{rt}\}$ — матрица баланса невозобновляемых ресурсов. b_{rt} — поступление ($b_{rt} > 0$) или использование ($b_{rt} < 0$) ресурса $r \in NR$ в момент времени $t \in T$.
- RR — множество возобновляемых ресурсов.
- $C = \{c_{rt}\}$ — матрица доступности возобновляемых ресурсов. c_{rt} — максимальное количество ресурса $r \in RR$, которое может использоваться во временном отрезке начинающимся в момент времени $t \in T$.
- $U = \{u_{jr}\}$ — матрица потребления ресурсов. u_{jr} — потребление ресурса $r \in NR \cup RR$ операцией $j \in J$.
- $G = (J, A)$ — граф отношений предшествования. A — множество дуг в графе. Наличие дуги $a = (a^-, a^+, l_a)$, $a \in A$, в графе G обозначает, что операция $a^+ \in J$ должна начаться не раньше чем момент начала операции $a^- \in J$ плюс смещение $l_a \in \mathbb{Z}$. Значение l_a может быть как положительным так и отрицательным. Формально, если S_j — момент начала операции j, то

$$S_{a^+} \geq S_{a^-} + l_a, \quad \forall a \in A.$$

4 Математическая модель

Вводятся бинарные переменные x. Каждая переменная x_{ijt} определяет выполняет ли операцию $j \in J$ космонавт $i \in I$ начиная с момента времени $t \in T_j$.

Также вводятся переменные y. Каждая переменная y_{rt} определяет количество доступного ресурса $r \in NR \cup RR$ в момент времени $t \in T$.

Введем также дополнительную операцию 0 длительности 1, которая означает «отдых» космонавта, $T_0 = T$.

Существуют следующие ограничения.

1. Каждая операция может быть выполнена не более одного раза каким-либо космонавтом:

$$\sum_{i \in I} \sum_{\substack{t \in T_j: \\ e_{ijt} > 0}} x_{ijt} \leq 1, \quad \forall j \in J. \tag{1}$$

2. Каждый космонавт может выполнять только одну операцию в каждый момент времени (если космонавт закончил выполнение операции, то он должен начать выполнение другой операции или начать отдых):

$$\sum_{\substack{j\in J\cup\{0\}:\\ e_{i,j,t_{\min}}>0}} x_{i,j,t_{\min}} = 1, \quad \forall i \in I.$$

$$\sum_{\substack{j\in J\cup\{0\}:\\ e_{ijt}>0}} x_{ijt} = \sum_{\substack{j\in J\cup\{0\}:\\ e_{i,j,t-p_j}>0}} x_{i,j,t-p_j}, \quad \forall i \in I,\ t \in T \setminus \{t_{\min}\}.$$

3. Для каждого невозобновляемого ресурса, его баланс в каждые момент времени должен быть положительным:

$$y_{r,t_{\min}} = b_{r,t_{\min}} - \sum_{i\in I} \sum_{\substack{j\in J:\\ e_{i,j,t_{\min}}>0}} u_{jr} x_{i,j,t_{\min}}, \quad \forall r \in NR.$$

$$y_{rt} = y_{r,t-1} + b_{rt} - \sum_{i\in I} \sum_{\substack{j\in J:\\ e_{ijt}>0}} u_{jr} x_{i,j,t_{\min}}, \quad \forall r \in NR,\ t \in T \setminus \{t_{\min}\}.$$

$$y_{rt} \geq 0, \quad \forall r \in NR,\ t \in T.$$

4. Для каждого возобновляемого ресурса, его используемое количество в каждый момент времени не может превышать его объем.

$$\sum_{i\in I} \sum_{j\in J} \sum_{\substack{t\in(t'-p_j,t']:\\ e_{ijt}>0}} u_{jr} x_{ijt} \leq c_{rt}, \quad \forall r \in RR,\ t \in T.$$

5. Отношения предшествования:

$$\sum_{i\in I} \sum_{\substack{t\in T:\\ e_{ia^+t}>0}} t x_{ia^+t} \geq \sum_{i\in I} \sum_{\substack{t\in T:\\ e_{ia^-t}>0}} t x_{ia^-t} + l_a, \quad \forall a \in A.$$

6. Целочисленные ограничения:

$$x_{ijt} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I,\ j \in J,\ t \in T : e_{ijt} > 0.$$

В случае «свертки» критериев приоритета и эффективности целевая функция выглядит как

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} w_j e_{ijt} x_{ijt}.$$

Если используется «двухэтапный» подход, на первом этапе определяется подмножество операций $J' \subseteq J$ для исполнения. При этом используется следующая целевая функция:

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{\substack{t \in T: \\ e_{ijt} > 0}} w_j x_{ijt}.$$

При «жестком» соблюдении приоритетов, добавляются ограничения

$$\sum_{i \in I} \sum_{\substack{t \in T: \\ e_{ijt} > 0}} x_{ijt} \geq \sum_{i \in I} \sum_{\substack{t \in T: \\ e_{ij't} > 0}} x_{ij't}, \quad \forall (j, j') \in J : w_j > w_{j'}.$$

На втором этапе, ограничения (1) меняются на

$$\sum_{i \in I} \sum_{\substack{t \in T_j: \\ e_{ijt} > 0}} x_{ijt} = 1, \quad \forall j \in J'.$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{\substack{t \in T_j: \\ e_{ijt} > 0}} x_{ijt} = 0, \quad \forall j \in J \setminus J'.$$

На втором этапе используется целевая функция

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J'} \sum_{t \in T} e_{ijt} x_{ijt}.$$

5 Подходы к решению задачи

5.1 «Точное» решение

Опишем сначала подходы к «точному» решению задачи, т.е. к получению гарантированного оптимального решения задачи.

Самым простым подходом является использование решателя смешанного целочисленного программирования (на английском, MIP solver, от Mixed Integer Programming). Недостатком здесь является тот факт, что лучшие решатели являются коммерческим программным продуктом, достаточно дорогим для приобретения.

Также могут возникнуть проблемы связанные с размерностью формулировки. Количество переменных x достаточно большое, и «прямое» решение может быть очень длительным. Актуальной здесь является «предобработка» формулировки с целью уменьшения количества переменных x. Алгоритм предобработки должен исключить переменные x, которые гарантировано не участвуют ни в каком оптимальном решении задачи. То есть, для каждой операции $j \in J$ алгоритм должен определить моменты времени, когда операция j не может начать выполняться в каком-либо оптимальном решений. Неспециализированные алгоритмы предобработки уже встроены в современные решатели, однако специализированные алгоритмы могут быть намного более эффективными.

Альтернативным подходом к решению задачи является использование решателя программирования в ограничениях (на английском, CP solver, от Constraint Programming). Лучшие такие решатели также являются коммерческим продуктом.

Для применения данного подхода, задача должна быть переформулирована как «задача по удовлетворению ограничениям» (на английском, Constraint Satisfaction Problem). Это будет сделать довольно просто. Вместо переменных x_{ijt} здесь будут использоваться переменные s_{ij}, — момент начала выполнения операции $j \in J$ космонавтом $i \in I$.

Достоинством метода программирования в ограничениях является используемая в нем фильтрация множества допустимых значений переменных s_{ij}. Наличие большого числа ограничений способствует большой эффективности фильтрации и, соответственно, уменьшению времени решения задачи. Отметим, что фильтрация может быть использована для предобработки MIP формулировки задачи. То есть может быть использован двухэтапный подход: на первом этапе CP-решатель проводит предобработку задачи с помощью встроенных в него алгоритмов фильтрации; затем на втором этапе MIP-решатель находит решение задачи, размер которой был уменьшен на первом этапе.

В случае неэффективности использования ни одного из решателей, к задаче может быть применена «ценовая» декомпозиция. В данном методе, задача разбивается на мастер-задачу и подзадачи для каждого кос-

монавта. Метод является итеративным. На каждой итерации в мастер-задаче происходит распределение операций среди космонавтов путем выбора из индивидуальных расписаний космонавтов, сгенерированных на предыдущих итерациях. На основе решения мастер задачи, устанавливается «ценность» каждой операции, которую можно понимать как ее вклад в целевую функцию. Затем, в подзадаче для каждого космонавта устанавливается может ли он выполнить некоторое подмножество операций с большей суммарной ценностью, чем их текущая ценность в решении мастер-задаче. Если это возможно, то генерируются соответствующие расписания, которые добавляются в мастер-задачу, и происходит переход на следующую итерацию. Заметим, что решение мастер-задачи и подзадач может осуществляться с помощью ранее упомянутых решателей.

5.2 Приближенное решение

Приближенное решение может быть получено с помощью представленных выше MIP- и CP-решателей. Обычно при их использовании, в процессе решения, пользователю становится доступно допустимое решение задачи, которое может улучшаться с течением времени. То есть процесс решения может быть прервано с истечением максимально допустимого времени решения, и при этом допустимое решение может быть получено от решателя.

В последнее время на рынке стали появляться решатели третьего типа, основанные на методе локального поиска (на английском, LS-solvers, от Local Search). Преимуществом данного метода является его «масштабируемость». То есть, LS-решатели могут применяться для решения дискретных задач большой размерности, что актуально в нашем случае. Недостатком данного типа решателей является невозможность получения точного решения задачи.

Для приближенного решения задачи также могут использоваться специализированные (мета-)эвристики, например, генетические алгоритмы, алгоритмы «муравьиных колоний», алгоритмы «поиска с запретами» (на английском, Tabu-search), и т.д.