ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ИМ. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Лаборатория №68 ИПУ РАН
"Теории расписаний и дискретной оптимизации"

Задача формирования расписаний действий экипажа на МКС

Лазарев Александр Островский Николай
Садыков Руслан

20 марта 2014 г.

Введение

Управление МКС

- Планирование функционирования объекта
- Обеспечение требуемого выполнения планов
- Сбор измерительной информации и ее контроль
- Моделирование возможных ситуаций
- Выработка управляющих команд
- Принятие решений по оперативной коррекции планов

Звенья функционирования МКС

- наземный комплекс управления (НКУ)
- бортовой контур автоматического управления (БКАУ)
- экипаж пилотируемой станции

Введение

Управление МКС

- Планирование функционирования объекта
- Обеспечение требуемого выполнения планов
- Сбор измерительной информации и ее контроль
- Моделирование возможных ситуаций
- Выработка управляющих команд
- Принятие решений по оперативной коррекции планов

Звенья функционирования МКС

- наземный комплекс управления (НКУ)
- бортовой контур автоматического управления (БКАУ)
- экипаж пилотируемой станции

Планирование действий экипажа

Этапы планирования полета МКС

- Стратегическое планирования (5 лет)
- Тактическое планирование (1 год)
- Исполнительное планирование (1 сутки – 1 экспедиция)

Проблемы планирования

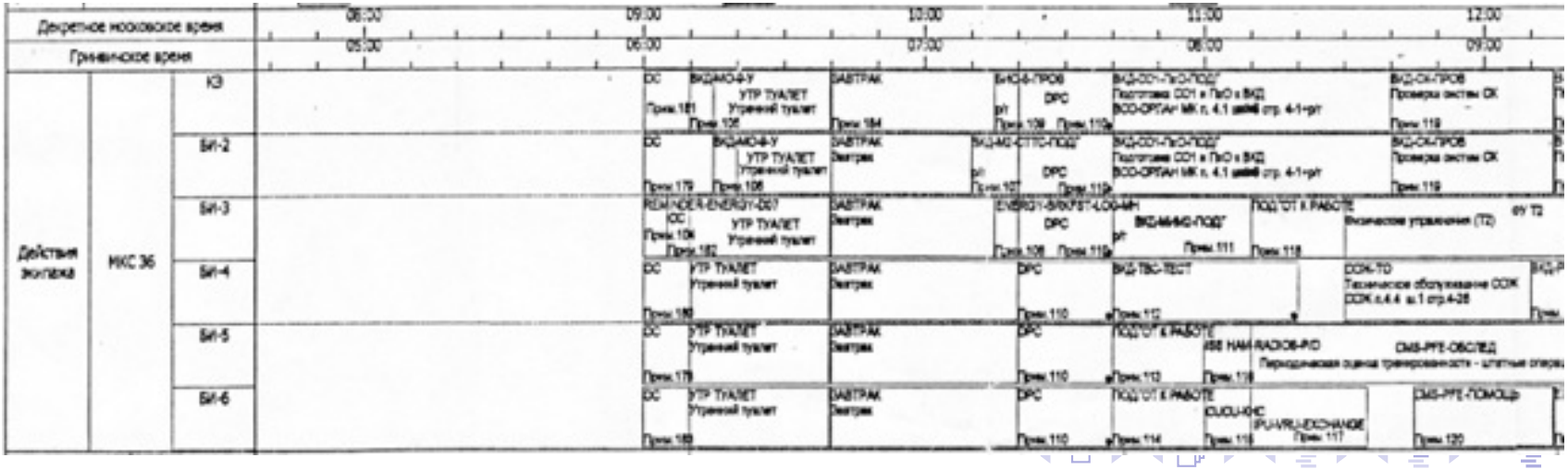
- Сложность и постоянное видоизменение объекта управления.
- Увеличение числа объектов $\Rightarrow$ рост количества требований и ограничений $\Rightarrow$ возрастание сложности задач управления.
- Частая необходимость перепланирования при дефиците времени в случае возникновения различных нештатных ситуаций.
- Увеличение количества специалистов, участвующих в выполнении задач.
- Анализ большого количества данных и учет ограничений при планировании новых работ.

Автоматизация процесса планирования

Преимущества

- 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.

Пример планирования



Постановка задачи планирования на одни сутки

Объекты планирования

- Множество операций для планирования J.
- Экипаж, состоящий из нескольких космонавтов — множество I.
- Горизонт планирования $T = [t_{\min}, t_{\max})$, разбитый на отрезки по 5 минут.
- Возобновляемые и невозобновляемые ресурсы — множества RR и NR.

Цель планирования

- Выбор подмножества операций для исполнения в течение горизонта планирования.
- Распределение операций между космонавтами.
- Определение времени выполнения каждой операции.

Характеристики операций

- Приоритет (важность) операции w_j.
- Время исполнения операции p_j.
- Отрезок (или отрезки) времени, когда операция может выполняться — множество T_j.
- Ресурсы необходимые для выполнения операции j (приборы, энергия, ...) задаются матрицей $U = \{u_{jr}\}$ $r \in NR \cup RR$.
- Эффективность выполнения космонавтом i операции j в момент времени t определяется матрицей $E = \{e_{ijt}\}$, $e_{ijt} \in [0, 1]$.

Дополнительные переменные

- Переменная x_{ijt} определяет выполняет ли операцию j космонавт i начиная с момента времени t.
- Переменная y_{rt} определяет количество доступного ресурса $r \in NR \cup RR$ в момент времени $t \in T$.
- Дополнительную операцию 0 длительности 1, которая означает «отдых» космонавта, $T_0 = T$.

Ограничения

- Каждая операция выполняется не больше одного раза.

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

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

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

- Если космонавт закончил выполнение операции, то он должен начать выполнение другой операции или начать отдых:

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

Ограничения

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

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

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

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

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

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

Ограничения

- Между операциями могут существовать отношения предшествования обобщенного типа заданные в виде графа $G = (J, A)$. 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 $l_a \in \mathbb{Z}$.
- Целочисленные ограничения:

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

Критерии качества плана операций

1. Максимизация числа операций включенных в план,
   - или «жесткое» соблюдение приоритетов,
   - или использование весов операций в целевой функции соответственно их приоритету
2. Максимизация суммарной эффективности выполнения операций включенных в план.

Максимизация числа операций

Разбивка задачи на два этапа.

- Этап 1. Выбор подмножества операций для исполнения с учетом приоритетов:

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

- При «жестком» соблюдении приоритетов, добавляются ограничения:

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

Максимизация числа операций

- Этап 2. Планирование выбранных операций с учетом эффективности:

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

- При «жестком» соблюдении приоритетов, добавляются ограничения:

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

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

Максимизация числа операций

- Используется «свертка» двух критериев в один с помощью весов:

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

Математическая модель

- Задача может быть сформулирована как задача смешанного целочисленного программирования (MIP — Mixed Integer Programming) с переменными:

  $x_{ijt} \in \{0, 1\}$ — космонавт i начал выполнять операцию j в момент времени t или нет.

- Задача может быть сформулирована как задача программирования в ограничениях (CP — Constraint Programming) с переменными:

  $x_{ij} \in \{0, 1\}$ — космонавт i выполняет операцию j или нет

  s_j — момент начала выполнения операции j

Подходы к «точному» решению задачи

- Применение решателя задач смешанно целочисленного программирования (MIP-solver)
- Применение решателя задач программирования в ограничениях (CP-solver)
  - Может быть использован для «предобработки» MIP-формулировки задачи с целью уменьшения ее размера.
- «Ценовая» декомпозиция задачи.
  - Мастер-задаче для распределения операций между космонавтами
  - Подзадачи для каждого космонавта для определения времени исполнения назначенных операций.

Подходы к приближенному решению задачи

- Применение MIP-решателя с ограничением на время исполнения.
- Применение CP-решателя с ограничением на время исполнения.
- Применение LS-решателя, основанного не методе локального поиска (Local Search solver).
- Эвристики основанные на «ценовой» декомпозиции задачи.
- Мета-эвристики
  - Генетические алгоритмы
  - Алгоритмы «муравьиных колоний»
  - Алгоритмы «поиска с запретами» (Tabu-search)
  - ...

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ
ПРОБЛЕМ
УПРАВЛЕНИЯ
ИМ. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Лаборатория №68 ИПУ РАН
"Теории расписаний и
дискретной оптимизации"

Спасибо за внимание!