

УДК 629.78

Организация управления наземными стартовыми комплексами в интересах оперативного развертывания орбитальных систем КА

А.С. Фадеев

Аннотация

Рассмотрены вопросы дальнейшего совершенствования организации управления наземными стартовыми комплексами на основе оптимизации стратегии развертывании перспективных орбитальных систем. Выбор средств выведения, необходимых для реализации заданного орбитального построения развертываемой спутниковой системы, а также соответствующих стартовых комплексов должен осуществляться на основе совместного учета баллистических, технологических, экологических и финансовых ограничений. сформулирована оптимизационная задача математического программирования, изложен способ её решения, базирующийся на идеях метода ветвей и границ.

Ключевые слова

космическая деятельность; наземная космическая инфраструктура; ракета-носитель; средства выведения; экологическая обстановка; космический аппарат; орбитальная система; стратегия развертывания; оптимизация управления организационно-технической системой

Введение

В настоящее время ракетно-космическая деятельность стала одной из ведущих отраслей мировой экономики, лежащей в основе наукоемких технологий XXI века. Достижения в исследовании и эксплуатации космоса являются одним из важнейших показателей уровня развития стран. К основным направлениям космической деятельности относятся использование космической техники для связи, телевизионного и радиовещания, использование навигационных и топогеодезических систем, пилотируемые космические полеты, испытания техники в условиях космоса, производство в космосе материалов и иной

продукции; использование космической техники, космических технологий в интересах обороны и безопасности, дистанционное зондирование Земли из космоса, включая экологический мониторинг и метеорологию и др. Возрастает роль космических систем в борьбе с международным терроризмом, наркобизнесом, пиратством; при обеспечении безопасности государственной границы РФ, защиты и охраны экономических и иных законных интересов Российской Федерации в пределах приграничной территории, исключительной экономической зоны и континентального шельфа Российской Федерации.

Современное экономическое состояние РФ позволяет осуществлять существенные инвестиции в развитие ракетно-космической отрасли: начато строительство нового космодрома «Восточный», совершенствуется инфраструктура существующих космодромов, наряду с созданием космических аппаратов (КА) различного целевого назначения модернизируются и разрабатываются новые средства выведения, в том числе мобильные. Всё это неизбежно приведет к возрастанию интенсивности пусков ракет-носителей. С другой стороны, при проведении запусков космических аппаратов должны быть неукоснительно выполнены требования по обеспечению экологической безопасности. В этих условиях особую актуальность приобретает задача оптимизации планирования проведения запусков космических аппаратов разнородными стационарными и мобильными средствами выведения в условиях ограниченного финансирования и выполнения требований экологической безопасности.

Постановка задачи

Пусть на период планирования (например, на год) известны требования (заявки, запросы) Заказчиков по выведению КА на заданные орбиты, включающие:

- дату готовности КА к транспортировке на космодром;
- массу спутника (спутников);
- параметры орбит запускаемых КА;
- минимально допустимую продолжительность "окна старта" для каждого КА;
- предельную дату выведения КА на орбиту;
- длительность транспортировки и расходы на доставку спутников на космодромы;
- перечень типов ракет-носителей (для выведения на орбиту каждого КА) и стартовых позиций, откуда может быть осуществлен их пуск;
- график потенциально возможного изготовления ракет-носителей (РН) каждого типа;

- длительность транспортировки и расходы на доставку разных типов РН на космодромы;
- расчетные значения заправляемого топлива на каждую ступень в зависимости от полезного груза и параметров орбиты выведения;
- предельные значения допустимой величины излишней заправки;
- цена единицы топлива (производство, транспортировка, хранение, заправка);
- длительность и стоимость восстановления стартовой позиции;
- перечень районов падения отделяемых частей (ОЧ) РН с указанием их границ.

Требуется составить такое расписание запусков КА, чтобы:

1. Все спутники в соответствии с требованиями Заказчика были выведены на заданные орбиты;
2. Стоимость закупки средств выведения была не выше заданной величины;
3. Были минимальны суммарные затраты на:
 - транспортировку КА и РН на космодромы;
 - восстановление стартовой позиции;
 - дополнительное топливо сверх номинальной заправки (дополнительное топливо необходимо для реализации экологически безопасной траектории выведения);
 - оплату мероприятий по восстановлению экологической обстановки и текущей аренды земельных участков районов падения (РП) ОЧ РН в части экологии.

Модифицированный метод ветвей и границ

Сформулированная задача относится к разделу комбинаторной оптимизации математического программирования, а именно, к классу задач теории расписаний. Из раздела комбинаторной оптимизации задачи теории расписаний являются наиболее сложными. Для их решения часто применяется метод ветвей и границ. Суть метода состоит в следующем. Идею классического метода ветвей и границ можно представить в виде задачи дискретного программирования в следующей общей форме: необходимо минимизировать $z = f(X)$ при условии $X \in G$, где G - некоторое конечное множество. В основе метода ветвей и границ лежат следующие построения, позволяющие в ряде случаев существенно уменьшить объем перебора.

- I. Вычисление нижней границы (оценки).** Находится нижняя граница (оценка) целевой функции f на множестве планов G (или некотором его подмножестве G'), т.е. такое

число $\zeta(G)$ ($\zeta(G')$), что для $X \in G$ имеет место $f(X) \geq \zeta(G)$ (соответственно для $X \in G'$ имеет место $f(X) \geq \zeta(G')$).

II. Разбиение на подмножества (ветвление). Реализация метода связана с постепенным разбиением множества планов G на дерево подмножеств (ветвлением). Ветвление проходит по следующей многошаговой схеме.

0 шаг. Подмножество $G^0 \equiv G$ разбивается на конечное число (обычно не пересекающихся) подмножеств $G_1^1, G_2^1, \dots, G_{r_1}^1$.

k-й шаг ($k \geq 1$). Имеются множества $G_1^k, G_2^k, \dots, G_{r_k}^k$, еще не подвергавшиеся ветвлению. Среди них выбирается множество $G_{v(k)}^k$ и разбивается на конечное число подмножеств: $G_{v(k),1}^k, G_{v(k),2}^k, \dots, G_{v(k),s(k)}^k$.

Еще не подвергавшиеся разбиению множества $G_1^k, G_2^k, \dots, G_{v(k)-1}^k, G_{v(k)+1}^k, \dots, G_{r_k}^k, G_{v(k),1}^k, G_{v(k),2}^k, \dots, G_{v(k),s(k)}^k$ заново обозначаются через $G_1^{k+1}, G_2^{k+1}, \dots, G_{r_{k+1}}^{k+1}$.

Несколько шагов такого процесса последовательного разбиения схематически изображены на рисунке 1.

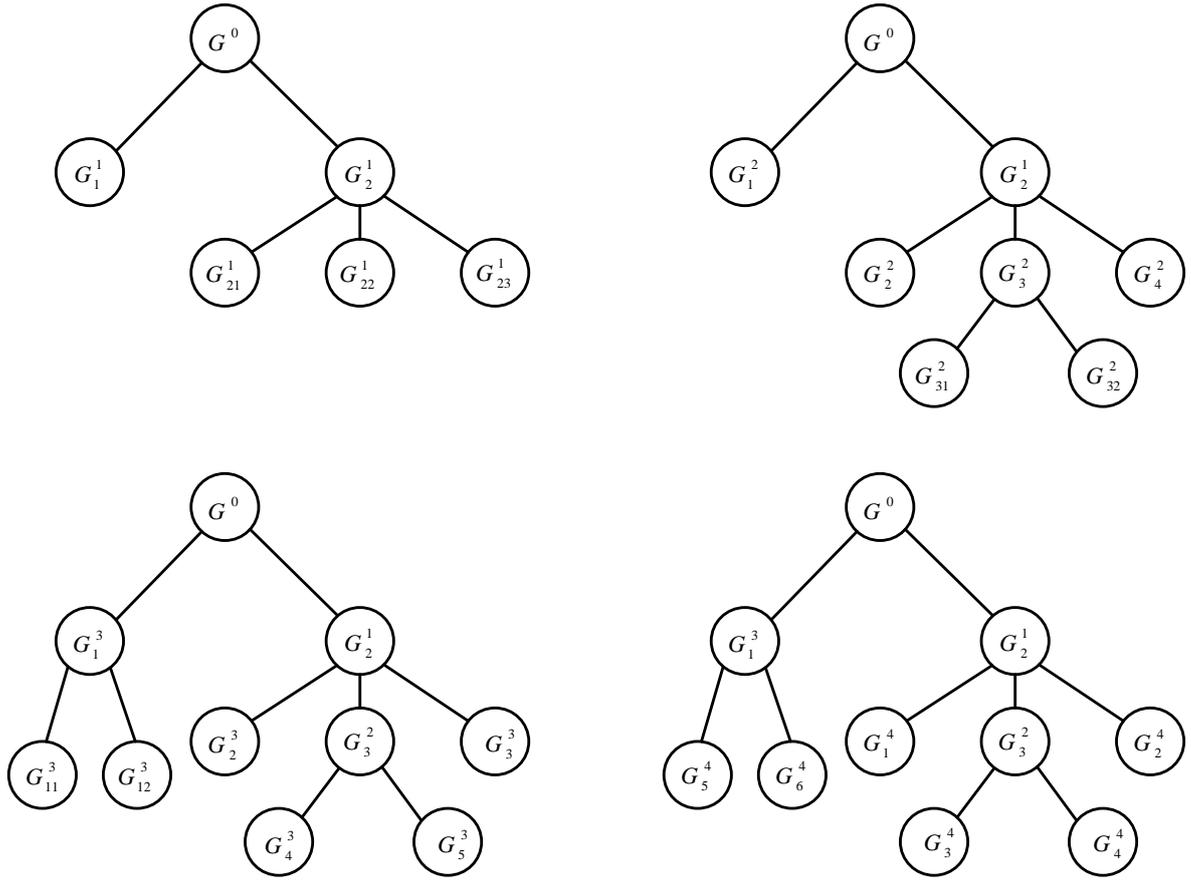


Рисунок 1 – Варианты процесса последовательного разбиения множества

III. Пересчет оценок. Если множество $G_1 \subset G_2$, то тогда очевидно, что

$$\min_{X \in G_1} f(X) \geq \min_{X \in G_2} f(X).$$

Поэтому, разбивая в процессе решения некоторое множество G' на подмножества G'_1, G'_2, \dots, G'_s : $G' = \bigcup_{i=1}^s G'_i$, всегда считается, что оценка для любого подмножества G'_i не меньше оценки для множества G' : $\zeta(G'_i) \geq \zeta(G')$, $i = 1, 2, \dots, s$. В конкретных случаях часто оказывается возможным добиться улучшения оценки, т.е. получить хотя бы для некоторых i строгое неравенство $\zeta(G'_i) > \zeta(G')$.

IV. Вычисление планов. Для конкретных задач существуют различные способы нахождения планов в последовательно разветвляемых подмножествах. Любой такой способ существенно опирается на специфику конкретной задачи.

V. Признак оптимальности. Если $G = \bigcup_{i=1}^s G_i$ и план \bar{X} принадлежит некоторому подмножеству G_ν , при этом $f(\bar{X}) = \zeta(G_\nu) \leq \zeta(G_i)$, $i = 1, 2, \dots, s$, то \bar{X} -

оптимальный план сформулированной выше задачи. Обычно этот признак применяется на некотором этапе ветвления.

VI. Оценка точности приближенного решения. Пусть $G = \bigcup_{i=1}^s G_i$, $\zeta = \min_{i=1,2,\dots,s} \zeta(G_i)$.

Если \bar{X} - некоторый план исходной задачи, т.е. $\bar{X} \in G$, тогда $\zeta \leq \min_{X \in G} f(X) \leq f(\bar{X})$.

Очевидно, что если разность $\Delta = f(\bar{X}) - \zeta$ мала (т.е. не превышает некоторого выбранного для данной задачи числа), то \bar{X} можно принять за приближенное решение, а Δ - за оценку точности приближения.

Исходя из вышеизложенного, можно предложить следующую формальную схему метода ветвей и границ:

0 шаг. Вычисляется оценка $\zeta(G) = \zeta(G^0)$. Если при этом $f(\bar{X}) = \zeta(G)$, то \bar{X} - оптимальный план. Если оптимальный план не найден, то множество $G = G^0$ разбивается на конечное число подмножеств $G^0 = G_1^1 \cup G_2^1 \cup \dots \cup G_{r_1}^1$ и осуществляется переход к первому шагу.

1 шаг. Вычисляются оценки $\zeta(G_i^1), i = 1, 2, \dots, r_1$. Если при этом удастся найти такой план \bar{X} , что $\bar{X} \in G_r^1$ для некоторого $r (1 \leq r \leq r_1)$ и $f(\bar{X}) = \zeta(G_r^1) \leq \zeta(G_i^1), i = 1, 2, \dots, r_1$, то \bar{X} - оптимальный план. Если же оптимальный план не найден, то выбирается "наиболее перспективное" для дальнейшего разбиения множество $G_{v(1)}^1$ по следующему правилу:

$\zeta(G_{v(1)}^1) = \min_{i=1,2,\dots,r_i} \zeta(G_i^1)$. Множество $G_{v(1)}^1$ разбивается на несколько подмножеств

(обычно непересекающихся): $G_{v(1)}^1 = G_{v(1),1}^1 \cup G_{v(1),2}^1 \cup \dots \cup G_{v(1),s(1)}^1$. Еще не подвергавшиеся разбиению множества

$G_1^1, G_2^1, \dots, G_{v(1)-1}^1, G_{v(1)+1}^1, \dots, G_{r_1}^1, G_{v(1),1}^1, G_{v(1),2}^1, \dots, G_{v(1),s(1)}^1$ заново обозначаются через $G_1^2, G_2^2, \dots, G_{r_2}^2$ и осуществляется переход ко второму шагу.

k-й шаг ($k \geq 2$). Вычисляются оценки $\zeta(G_i^k), i = 1, 2, \dots, r_k$. Если при этом удается найти такой план \bar{X} , что $\bar{X} \in G_r^k$ для некоторого $r(1 \leq r \leq r_k)$ и $f(\bar{X}) = \zeta(G_r^k) \leq \zeta(G_i^k), i = 1, 2, \dots, r_k$, то \bar{X} - оптимальный план. Если же оптимальный план не найден, то снова выбирается наиболее перспективное множество $G_{v(k)}^k$ по правилу: $\zeta(G_{v(k)}^k) = \min_{i=1, 2, \dots, r_k} \zeta(G_i^k)$. Множество $G_{v(k)}^k$ разбивается на несколько непересекающихся подмножеств $G_{v(k)}^k = G_{v(k),1}^k \cup G_{v(k),2}^k \cup \dots \cup G_{v(k),s(k)}^k$. Еще не подвергавшиеся разбиению множества $G_1^k, \dots, G_{v(k)-1}^k, G_{v(k)+1}^k, \dots, G_{r_k}^k, G_{v(1),1}^k, G_{v(1),2}^k, \dots, G_{v(k),s(k)}^k$ заново обозначаются через $G_1^{k+1}, G_2^{k+1}, \dots, G_{r_{k+1}}^{k+1}$, и осуществляется переход к $(k + 1)$ -му шагу.

Для реализации описанной выше схемы метода ветвей и границ применительно к отдельным задачам необходимо, исходя из особенностей этих задач, конкретизировать правила ветвления, вычисления оценок (границ) и нахождения планов.

Таким образом, в классическом методе ветвей и границ проводится сравнение текущей оценки значения целевой функции с уже вычисленной нижней границей (оценкой), на результате этого сравнения принимается решение об отсечении неперспективной ветви.

Другим способом решения определенного подкласса задач теории расписаний является сведение их, если это возможно, к другим известным задачам, методы которых более изучены, например, к задачам о назначениях. При разработке методики синтеза допустимых планов запуска космических аппаратов использованы идеи изложенных способов: варьирование "границы" по временному показателю (схема варьирования представлена на рисунке 2); дальнейшая проверка реализуемости хотя бы одного допустимого плана при фиксированной "границе"; генерация всего множества допустимых планов ("ветвление") для заданной "границы".

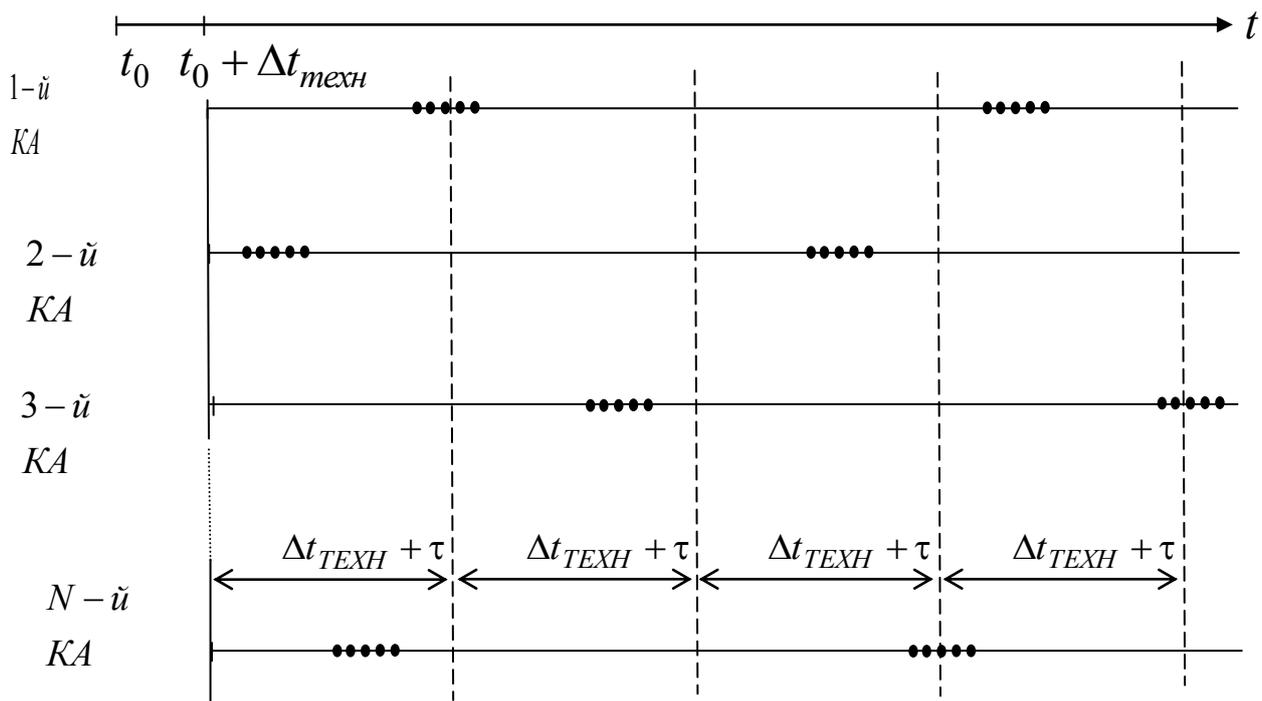


Рисунок 2 – Варьирование "границей" при формировании исходных данных для задачи назначений за счет изменения параметра τ

Методика синтеза управления наземным стартовым комплексом

Основные этапы методики синтеза допустимых планов запуска КА заключаются в следующем:

1. Расчет исходных данных для планирования запусков КА на заданный период: возможных интервалов запусков ("окон старта") с учетом возможности бокового маневрирования РН, значений целевой функции.

2. Сведение задачи планирования как задачи теории расписаний к задаче о назначениях:

- назначить параметр τ . Разбить период планирования на несколько этапов длительностью $\Delta t_{ТЕХН} + \tau$. На основе исходных данных шага 1 составить матрицу возможных назначений;
- решить задачу о назначениях с минимаксной целевой функцией;

- если допустимого решения не существует, то величина τ увеличивается и операции шага 2 повторяются до тех пор, пока не будет получено решение задачи о назначениях.

3. Генерация множества допустимых планов на основе результатов решения задачи о назначениях; проверка допустимости каждого генерируемого плана.

Задача о назначениях состоит в том, чтобы распределить заданную совокупность задач (работ) между исполнителями так, чтобы эффективность варианта распределения (или варианта назначения исполнителей на работы - отсюда и название данного класса задач) была максимальной. Выделяют два подкласса задач - с аддитивной (линейной) и с минимаксной целевой функцией. Для решения данных задач разработан ряд методов, среди которых наиболее эффективным считается так называемый венгерский метод. В рассматриваемой задаче планирования запусков КА в качестве задач, подлежащих обязательному выполнению, рассматриваются собственно запуски космических аппаратов, а в качестве исполнителей, назначаемых для выполнения работ, выступают кортежи, включающие в свой состав ракету-носитель, стартовую позицию и совокупность районов падения по количеству отделяемых частей данного типа РН. Основные характеристики выполнения каждой работы (запуск космического аппарата) каждым "комбинированным исполнителем" рассчитываются на первом этапе разработанной методики. Использование методов решения задач о назначениях позволяет значительно сократить количество рассматриваемых планов (ветвлений) по сравнению с методом ветвей и границ. В дальнейшем при проверке реализуемости (допустимости) генерируемых планов контролируется количество задействованных ракет-носителей, сроки их поставки, допустимые сроки выполнения всех технологических операций по транспортировке КА и средств выведения, подготовке к запуску и т.п.

Таким образом, предложена методика синтеза допустимых планов на основе использования методов решения задач о назначениях и идеи метода ветвей и границ, которая в сочетании с известными методиками оценки степени влияния последствий падения отделяемых частей в заданные районы на их экологическую обстановку и оптимизации экономических ресурсов наземной космической инфраструктуры позволяет осуществлять планирование выведения КА на заданный временной интервал и управление наземными стартовыми комплексами в процессе развертывания перспективных орбитальных систем.

Список использованных источников

1. Калинин В. Н., Резников Б. А., Варакин Е. И. Теория систем и оптимального управления. – МО СССР, 1987. – Ч. 2: Понятия, модели, методы оптимального выбора. – 589 с.
2. Виноградова Т. Д. Целочисленная распределительная задача // Техническая кибернетика. – 1969. – №5. – С. 47-53.
3. Михалевич В. С., Трубин В. А., Шор Н. З. Оптимизационные задачи производственно-транспортного планирования. – М.: Наука, 1986. – 256 с.
4. Пападимитриу Х., Стайглиц К. Комбинаторная оптимизация. – М.: Мир, 1985. – 512 с.
5. Вентцель Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – 2-е изд., стер. – М.: Наука, 1988. – 208 с.

Сведения об авторе

Фадеев Александр Сергеевич, генеральный директор ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры», к.т.н;
ул. Щепкина, 42; г. Москва, 107996;
тел.: +7 (495) 631-82-89; e-mail: tsenki@roscosmos.ru.

