УДК 629.78

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ НАЗЕМНЫМИ СТАРТОВЫМИ КОМПЛЕКСАМИ В ИНТЕРЕСАХ ОПЕРАТИВНОГО РАЗВЕРТЫВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОРБИТАЛЬНЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А.С. Фадеев
(ФГУП «*Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры*»)

Рассмотрены вопросы дальнейшего совершенствования организации управления наземными стартовыми комплексами на основе оптимизации стратегии развертывания 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 учёта 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, планирование пусков ракет-носителей, экологическая обстановка, космический аппарат, орбитальная система, стратегия развертывания, экономические ресурсы, оптимизация управления организационно-технической системой.*

Введение

В настоящее время ракетно-космическая деятельность стала одной из ведущих отраслей мировой экономики, лежащей в основе наукоёмких 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; теле- и радиовещания; использование навигационных и топогеодезических систем; пилотируемые космические полёты и 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 существенно инвестировать 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. С одной стороны, всё это неизбежно приведёт к возрастанию интенсивности пусков ракет-носителей. С другой стороны, при проведении запусков КА должны быть неукоснительно выполнены требования по обеспечению экологической безопасности. В этих условиях особую актуальность приобретает задача оптимизации планирования проведения запусков КА 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 осуществлён их пуск;
- график потенциально возможного изготовления ракет-носителей (РН) каждого типа;
- длительность транспортировки и расходы на доставку разных типов РН на космодромы;

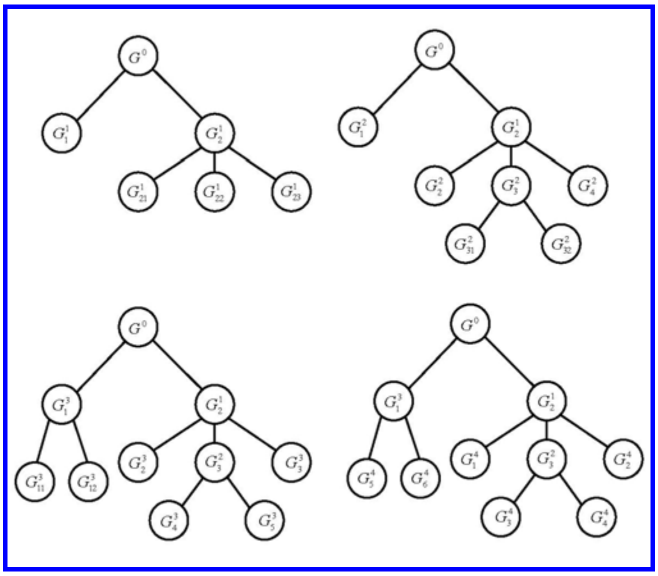

Рис. 1. Варианты процесса последовательного разбиения множества

- расчётные 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:

– все спутники в соответствии с требованиями Заказчика были выведены на заданные орбиты;

– стоимость закупки средств выведения была не выше заданной величины;

– 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 [1 – 5]. 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 объём перебора.

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 $f(X) \geq \zeta(G')$).

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 $G_1^1,\ G_2^1,\ ...,\ G_{r_1}^1$;

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

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

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

Пересчёт оценок. Если множество $G_1 \subset G_2$, то тогда очевидно, что $\min\limits_{X \in G_1} f(X) \geq \min\limits_{X \in G_2} f(X)$. В связи с этим разбивая в процессе решения некоторое множество G' на подмножества G_1', G_2', G_s': $G' = \bigcup_{i=1}^{s} G_i'$, всегда считается, что оценка для любого подмножества G_i' не меньше оценки для множества G': $\zeta(G_i') \geq \zeta(G'),\ i = 1,\ 2,\ ...,\ s$. В конкретных случаях часто оказывается возможным добиться улучшения оценки, т. е. получить хотя бы для некоторых i строгое неравенство $\zeta(G_i') > \zeta(G')$.

Вычисление планов. Для конкретных задач существуют различные способы нахождения планов в последовательно разветвляемых подмножествах.

Любой такой способ существенно опирается на специфику конкретной задачи.

Признак оптимальности. Если $G=\bigcup_{i=1}^{s} G_i$ и план $\bar{X}$ принадлежит некоторому подмножеству G_v при этом $f(\bar{X})=\zeta(G_v)\le\zeta(G_i),\ i=1,\ 2,\ ...,\ s,$ то $\bar{X}$ – оптимальный план сформулированной выше задачи. Обычно этот признак применяется на некотором этапе ветвления.

Оценка точности приближенного решения. Пусть $G=\bigcup_{i=1}^{s} G_i$, $\zeta=\min\limits_{i=1,2,...,s}\zeta(G_i)$. Если $\bar{X}$ – некоторый план исходной задачи, т. е. $\bar{X}\in G$, тогда $\zeta\le\min\limits_{X\in G} f(X)\le f(\bar{X})$.

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 $G^0=G_1^1\cup G_2^1\cup...\cup G_{r_1}^1$ и осуществляется переход к первому шагу;

– *1 шаг.* Вычисляются оценки $\zeta(G_i^1),\ i=1,\ 2,\ ...,\ r_1$. Если при этом удается найти такой план $\bar{X}$, что $\bar{X}\in G_r^1$ для некоторого $r(1\le r\le r_1)$ и $f(\bar{X})=\zeta(G_r^1)\le\zeta(G_i^1),\ i=1,\ 2,\ ...,\ r_i$, то $\bar{X}$ – оптимальный план. Если же оптимальный план не найден, то выбирается «наиболее перспективное» для дальнейшего разбиение множества $G_{v(1)}^1$ по следующему правилу: $\zeta(G_{v(1)}^1)=\min\limits_{i=1,2,...,r_i}\zeta(G_i^1)$. Множество $G_{v(1)}^1$ разбивается на несколько подмножеств (обычно непересекающихся): $G_{v(1)}^1=G_{v(1),1}^1\cup G_{v(1),2}^1\cup...\cup G_{v(1),s(1)}^1$. Ещё не подвергавшиеся разбиению множества $G_1^1, G_2^1,\ ...,\ G_{v(1)-1}^1, G_{v(1)+1}^1,\ ...,\ G_{r_1}^1, G_{v(1),1}^1, G_{v(1),2}^1,\ ...,\ G_{v(1),s(1)}^1$ заново обозначаются через $G_1^2, G_2^2,..., G_{r_2}^2$, и осуществляется переход ко второму шагу;

– *k-й шаг (k ≥ 2).* Вычисляются оценки $\zeta(G_i^k), i=1,\ 2,...,\ r_k$. Если при этом удаётся найти такой план $\bar{X}$, что $\bar{X}\in G_r^k$ для некоторого $r(1\le r\le r_k)$ и $f(\bar{X})=\zeta(G_r^k)\le\zeta(G_i^k),\ i=1,2,\ ...,r_k$, то $\bar{X}$ – оптимальный план. Если же оптимальный план не найден, то снова выбирается наиболее перспективное множество $G_{v(k)}^k$ по правилу: $\zeta(G_{v(k)}^k)=\min\limits_{i=1,2,...,r_k}\zeta(G_i^k)$. Множество $G_{v(k)}^k$ разбивается на несколько непересекающихся подмножеств $G_{v(k)}^k=G_{v(k),1}^k\cup G_{v(k),2}^k\cup...\cup G_{v(k),s(k)}^k$. Ещё не подвергавшиеся разбиению множества $G_1^k,\ ...,G_{v(k)-1}^k,\ G_{v(k)+1}^k,\ ...,G_{r_k}^k,\ G_{v(1),1}^k,\ G_{v(1),2}^k,\ ...,G_{v(k),s(k)}^k$ заново обозначаются через $G_1^{k+1}, G_2^{k+1},\ ...,\ G_{r_{k+1}}^{k+1}$, 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 определённого 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 КА использованы идеи изложенных способов: варьирование «границы» по временному показателю (схема варьирования представлена на рис. 2); дальнейшая проверка реализуемости хотя бы одного допустимого плана при фиксированной «границе»; генерация всего

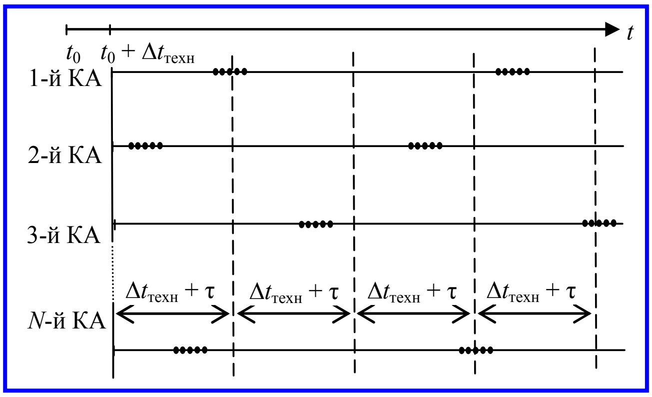

Рис. 2. Варьирование «границей» при формировании исходных данных для задачи назначений за счёт изменения параметра τ

множества допустимых планов («ветвление») для заданной «границы».

Методика синтеза управления наземным стартовым комплексом

Основные этапы методики синтеза допустимых планов запуска КА следующие:

1. Расчёт исходных данных для планирования запусков КА на заданный период: возможных интервалов запусков («окон старта») с учётом 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 $\Delta t_{\text{техн}} + \tau$. 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 КА, а в качестве исполнителей, назначаемых для выполнения работ, выступают кортежи, включающие в свой состав РН, стартовую позицию и совокупность районов падения по количеству отделяемых частей данного типа РН. Основные характеристики выполнения каждой работы (запуск КА) 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 РН, 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 временный интервал и управление наземными стартовыми комплексами в процессе развертывания перспективных орбитальных систем.

Литература

1. Калинин В. Н. Теория систем и оптимального управления. Часть 2. Понятия, модели, методы оптимального выбора / В. Н. Калинин, Б. А. Резников, Е. И. Варакин. – МО СССР, 1987. – 589 с.
2. Целочисленная распределительная задача / Т. Д. Виноградова // Техническая кибернетика. – 1969. – № 5. – С. 47 – 53.
3. Михалевич В. С., Трубин В. А., Шор Н. З.Оптимизационные задачи производственно-транспортного планирования / В. С. Михалевич, В. А. Трубин, Н. З. Шор. – 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 / Е. С. Вентцель. – 2-е изд., стер. – М. : Наука, 1988. – 208 с.

Поступила в редакцию 26.07.2012

***Александр Сергеевич Фадеев**, канд. техн. наук,*
генеральный директор, т. (495) 631-82-89,
e-mail: tsenki@roscosmos.ru.