Миронов А.Н., Сизяков Н.П., Шестопалова О.Л. Обеспечение качества функционирования системы космического информационного обеспечения на основе оптимального распределения запусков космических аппаратов по элементам системы средств выведения // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования, 2018. № 4(44).

УДК 004.942+519.718

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАПУСКОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО ЭЛЕМЕНТАМ СИСТЕМЫ СРЕДСТВ ВЫВЕДЕНИЯ

Миронов А.Н., доктор технических наук, профессор, профессор Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского

Сизяков Н.П., доктор технических наук, заместитель директора АО «Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт имени академика А.И. Берга» (ЦНИРТИ)

Шестопалова О.Л., кандидат технических наук, доцент, декан Байконурского филиала Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

В статье описана модель поиска наиболее приемлемого варианта распределения задач выведения космических аппаратов по элементам системы средств выведения. Целью моделирования является максимизация числа успешно выполняемых задач выведения космических аппаратов на заданном интервале планирования функционирования системы космического информационного обеспечения при имеющихся ограничениях по надежности, стоимости и интенсивности выведения. Решаемая задача математически сформулирована как задача одномерного булевого целочисленного программирования. Приведен алгоритм решения задачи. Модель может быть полезна при планировании запусков космических аппаратов, а также при формировании путей развития системы космического информационного обеспечения.

Ключевые слова: система космического информационного обеспечения, космический аппарат, система средств выведения, булево целочисленное программирование, метод ветвей и границ.

iea.gostinfo.ru

UDC 004.942+519.718

QUALITY FUNCTIONING ASSURANCE OF SPACE INFORMATION SUPPORT SYSTEM TO THE BASIS FOR OPTIMAL ALLOCATION OF RUNS SPACECRAFT ON THE ELEMENTS OF THE LAUNCH SYSTEM

Mironov A. N., doctor of technical Sciences, Professor, Professor of the military space Academy named after A. F. Mozhaisky
Siziakov N. P. doctor of technical Sciences, Deputy Director of JSC «Central research Radiotechnical Institute named after academician A.I. Berg» (TSNIRTI).
Shestopalova O.L., candidate of technical sciences, associate professor, the dean of the Baikonur Branch of the Moscow aviation institute (national research university)

The article describes a model to find the most appropriate variant of distribution of spacecraft launch tasks for the elements of the launch system. The objective of the modeling is to maximize the number of successfully performed tasks at a specified interval planning of space information support system with existing constraints on reliability, cost and intensity mix. Solvable problem is mathematically formulated as the problem of one-dimensional Boolean integer programming. The algorithm of solving of the problem is shown. The model can be useful when planning the launches of spacecraft, as well as in the justification of requirements for new of space information support system.

Keywords: space information support system, space vehicle, system, launch means, Boolean and integer programming, the method of branches and borders.

iea.gostinfo.ru

Одним из важных этапов обеспечения качества функционирования системы космического информационного обеспечения является анализ возможностей выполнения всей совокупности задач по выведению космических аппаратов (КА) на заданные орбиты с помощью существующей структуры системы средств выведения ССВ [1-3].

В случае отрицательного ответа на данный вопрос, должны быть разработаны и проанализированы на предмет практической реализуемости возможные варианты развития инфраструктуры средств выведения [4-6].

Цель исследования - необходимо найти наиболее приемлемый вариант

распределения задач выведения по элементам системы средств выведения, чтобы при имеющихся ограничениях по надежности, стоимости и интенсивности выведения максимизировать число успешно выполняемых задач (запусков КА) на интервале планирования.

Пусть задана $T_{\text{Пл}}$ - правая граница интервала планирования развития ССВ. Для временного интервала $t \in [0, T_{\text{Пл}}]$ определен перечень из K задач выведения (ЗВ) $Z^t_{\{K\}} = \{z^t_1, z^t_2, ..., z^t_K\}$. Каждая ЗВ предполагает запуск полезного груза (ПГ) - КА массой m_k, $k \in \{1,2,...,K\}$ на некоторую орбиту $o \in \{1,2,...,O\}$.

Для каждой k-й ЗВ определены требования по надежности $P_k^{\min}$ и стоимости $S_k^{\max}$ выведения ПГ. Определено текущее состояние структуры элементов ССВ $B^t_{\{N\}} = \{b^t_1, b^t_2, ..., b^t_N\}$. Каждый элемент структуры ССВ есть средство выведения (СВ) l-го типа, $l \in [1, L]$, с соответствующей наземной космической инфраструктурой (НКИ). Для каждого n-го элемента ССВ определены значения параметров: M_{no} - максимальной массы выводимого ПГ на орбиту $o \in \{1,2,...,O\}$, P_{no} - показателя надежности выведения ПГ на орбиту $o \in \{1,2,...,O\}$, S_{no} - стоимости выведения ПГ на орбиту $o \in \{1,2,...,O\}$, $W_{no}^{\max}$ - максимальной интенсивности выведения ПГ на орбиту $o \in \{1,2,...,O\}$.

Среди всего множества распределений ЗВ по элементам ССВ необходимо найти такой вариант, чтобы число успешно выполняемых ЗВ на интервале планирования развития ССВ было максимально при выполненных ограничениях по надежности, стоимости и интенсивности запусков КА[7,8]

В формализованном виде постановка задачи исследований может быть записана как

$$X^* = \arg\max_{X \in \Delta_X} J(X), \quad J(X) = \sum_{k=1}^{K} \sum_{n=1}^{N} \beta_k x_{kn}, \tag{1}$$

где $X = \|x_{kn}\|_{K \times N}$ - вариант размещения ЗВ по элементам ССВ,

iea.gostinfo.ru

$$x_{kn} = \begin{cases} 1, \text{если } k\text{ - я задача решается на } n\text{ - м элементе,} \\ 0, \text{в противном случае.} \end{cases}$$

δ_{ko} - вспомогательная переменная,

$$\delta_{ko} = \begin{cases} 1, \text{если КА в } k\text{ - й задаче выводится на } o\text{ - ю орбиту,} \\ 0, \text{в противном случае.} \end{cases}$$

$\beta_k \in [0,1]$ - вес (степень важности) k -й задачи, $\sum_{k=1}^{K} \beta_k = 1$,

Задача (1) решается при ограничениях:

$$\sum_{n=1}^{N} x_{kn} \le 1, \forall k = 1,2,...,K \tag{2}$$

$$\sum_{k=1}^{K} x_{kn} \times m_k \times \delta_{ko} \le M_{no}, \forall n = 1,2,...,N, \forall o = 1,2,...,O^* \tag{3}$$

$$\max_{k=1,2,...,K} \{P_k^{\min} \times x_{kn} \times \delta_{ko}\} \le P_{no}, \forall n = 1,2,...,N, \forall o = 1,2,...,O^* \tag{4}$$

$$\sum_{k=1}^{K} S_k^{\max} \times x_{kn} \times \delta_{ko} \ge S_{no}, \forall n = 1,2,...,N, \forall o = 1,2,...,O^* \tag{5}$$

$$\max_{k=1,2,...,K} \{x_{kn} \times \delta_{ko}\} \le (T_{Пл} - t) \times W_{no}^{\max}, \forall n = 1,2,...,N, \forall o = 1,2,...,O \tag{6}$$

Сущность ограничений следующая [9]: (2) – одну ЗВ можно решить только на одном элементе ССВ, т.е. ЗВ нельзя разбивать по частям для выполнения на разных элементах ССВ; (3) – суммарная масса ПГ ограничена максимальной грузоподъемностью СВ; (4) –надежность решения любой ЗВ не должна быть ниже заданной; (5) –стоимость решения ЗВ не должна быть выше заданной предельной величины; (6) –интенсивность решения ЗВ по каждому элементу ССВ не может быть выше заданной предельной величины.

Алгоритм выбора оптимального варианта распределения ЗВ по элементам структуры ССВ приведен на рис. 1 и сводится к выполнению следующих операций:

1. Определение значения горизонта планирования космической деятельности $T_{\text{Пл}}$.

iea.gostinfo.ru

2. Определение состава задач по выведению КА заданной массы на заданные орбиты

$Z^t_{\{K\}} = \{z^t_1, z^t_2, ..., z^t_K\}, t \in [0, T_{\text{Пл}}]\ m_k,\ k \in \{1,2,...,K\},\ \text{o} \in \{1,2,...,O^*\}.$

3. Определение требований по надежности и стоимости выведения для каждой задачи $P_k^{\min}$, $S_k^{\max}, k \in \{1,2,...,K\}$.

4. Определение имеющегося на рассматриваемый момент времени состава элементов ССВ $B^t_{\{N\}} = \{b^t_1, b^t_2, ..., b^t_N\}$.

5. Определение значений параметров массы, надежности, стоимости и максимальной интенсивности выведения для каждого элемента ССВ M_{no}, P_{no}, $S_{no}, W_{no}^{\max}, n \in \{1,2,...,N\}$.

6. Расчет размерности задачи выбора оптимального варианта распределения задач по элементам структуры ССВ $CARD(X) = N^K$.

iea.gostinfo.ru

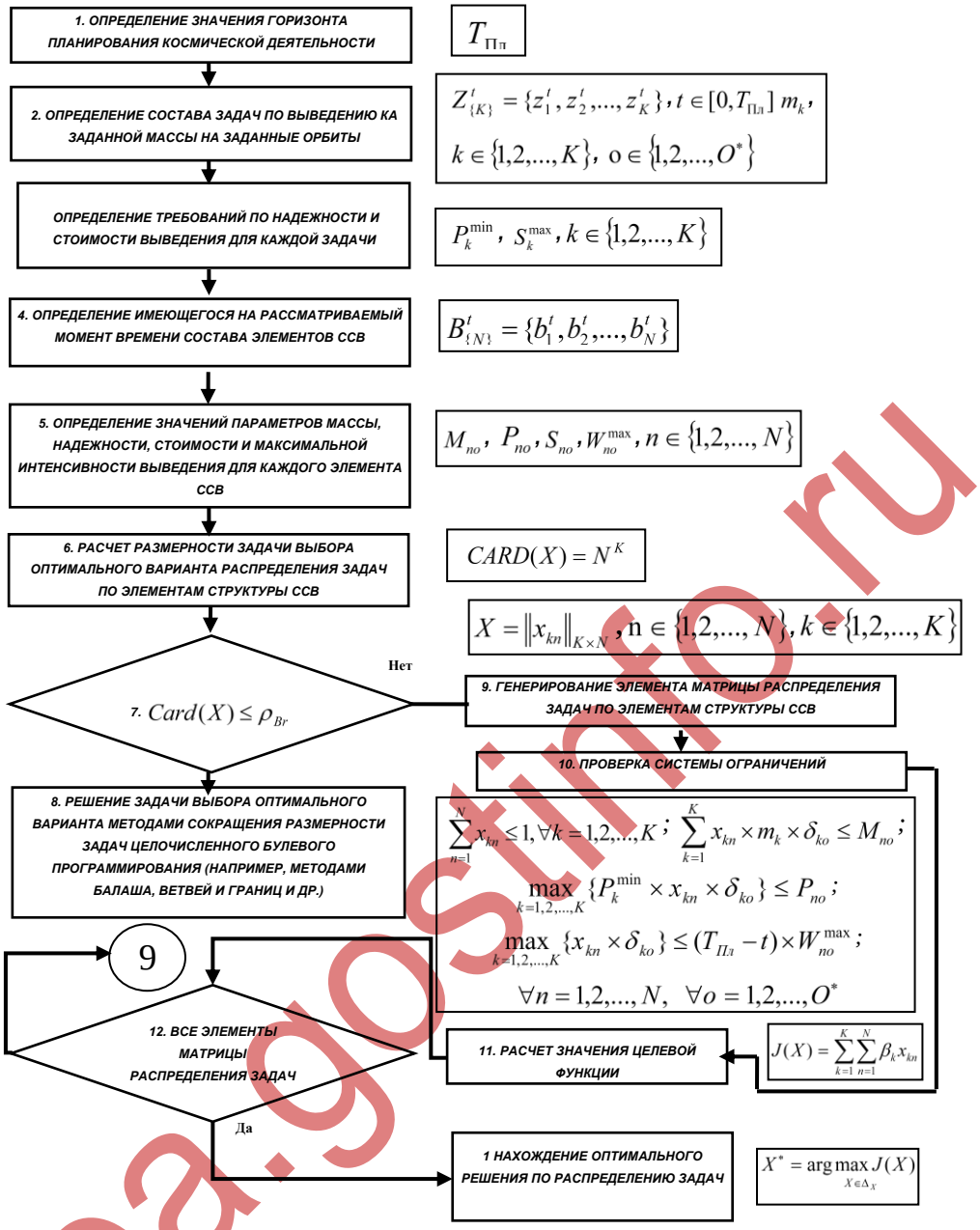

Рис. 1. Алгоритм выбора оптимального варианта распределения задач по элементам структуры ССВ

7. Проверка условия $Card(X) \le \rho_{Br}$, где ρ_{Br} - порог Бремермана-Эшби.

8. Если условие (3) выполнено, генерируется элемент матрицы распределения задач по элементам структуры ССВ $X = \|x_{kn}\|_{K \times N}$, $n \in \{1,2,...,N\}$, $k \in \{1,2,...,K\}$

9. Проводится проверка системы ограничений

iea.gostinfo.ru

$$\sum_{n=1}^{N} x_{kn} \le 1, \forall k = 1,2,...,K; \ \sum_{k=1}^{K} x_{kn} \times m_k \times \delta_{ko} \le M_{no};$$

$$\max_{k=1,2,...,K} \{P_k^{\min} \times x_{kn} \times \delta_{ko}\} \le P_{no}; \ \max_{k=1,2,...,K} \{x_{kn} \times \delta_{ko}\} \le (T_{Пл} - t) \times W_{no}^{\max}, \forall n = 1,2,...,N,$$

$$\forall o = 1,2,...,O^*$$

10. Рассчитывается значение целевой функции $J(X) = \sum_{k=1}^{K} \sum_{n=1}^{N} \beta_k x_{kn}$.

11. Проверяется условие, все ли элементы матрицы распределения задач рассмотрены?

12. Если все, то находится оптимальное решение по распределению задач $X^* = \arg\max_{X \in \Delta_X} J(X)$.

13. Если не все элементы матрицы распределения задач рассмотрены, то осуществляется переход к шагу 9.

14. Если условие (3) не выполнено, то выполняется решение задачи выбора оптимального варианта методами сокращения размерности задач целочисленного булевого программирования (ЦЧБП) (например, методами Гомори, ветвей и границ и др.).

Задачу ЦЧБП в общем случае можно сформулировать следующим образом [10]. Необходимо найти минимальное значение функции Z, которая является линейной, при наложенных ограничениях:

$$Z = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j, \quad \sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j = b_i, \quad i = 1,2,...,m, \quad x_j \ge 0, \quad x_j \text{ - целые.} \tag{7}$$

Предположим, что все решения задачи ЦЧБП принадлежат некоторой области. При наложении условия целочисленности допустимое множество решений задачи ЦЧБП в общем случае не является выпуклым и представляет собой некоторое дискретное конечное множество точек.

При добавлении целочисленных ограничений (при условии, что в качестве многогранника решений используется множество, ограниченное осями координат и новым контуром) возникает новая задача линейного

ica.gostinfo.ru

программирования. Ей присущи следующие свойства: новая область решений накрывает все целые точки, принадлежавшие первоначальной области решений, а ее угловые точки принадлежат множеству целых чисел; при построении такой области оптимальное решение является целочисленным.

При решении задачи (7) с помощью симплексного метода решение может не быть целочисленным, поэтому в общем случае требуется специальные методы, например, метод Гомори и метод ветвей и границ.

Метод Гомори базируется на симплексном методе. При этом на начальном этапе ограничение целочисленности не накладывается. Оптимальное решение ищется с помощью симплексного метода [10]. Если сразу находится оптимальное решение в целочисленной форме, дальнейший поиск останавливается. Если в состав множества решений входит хотя бы одна нецелочисленная компонента, то формируется дополнительное ограничение для x_i, которое учитывает целочисленность компонент решения. Поиск продолжается до получения нового оптимального решения. Описанная процедура повторяется до нахождения целочисленного оптимального решения.

В случае использования метода ветвей и границ на первом этапе находится оптимальное решение задачи также без наложения требования целочисленности. Если компоненты полученного решения не содержат дробных чисел, то делается вывод о том, что искомое решение задачи найдено и $Z_{\max} = Z(X_0)$. Если компоненты решения X_0 содержат дробные числа, то осуществляется итеративный переход к новым множествам решений, до тех пор, пока не находится целочисленное оптимальное решение.

В случае, когда промежуточное решение X_0 не удовлетворяет условию целочисленности, можно показать, что полученное значение будет не более ближайшего меньшего целого числа K_{i0}, либо не менее ближайшего большего целого числа $K_{i0}+1$. Задав эти числа, можно записать две постановки задач

iea.gostinfo.ru

линейного программирования, решить которые можно с помощью симплексного метода:

$$(I)\ \begin{cases} F=\sum_{j=1}^{n} c_j x_j \to \max, \\ \sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j = b_i \ \ (i=\overline{1,m}), \\ x_{i0} \le K_{i0} \\ x_j \ge 0 \ \ (j=\overline{1,n}); \end{cases} \qquad (II)\ \begin{cases} F=\sum_{j=1}^{n} c_j x_j \to \min, \\ \sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j = b_i \ \ (i=\overline{1,m}), \\ x_{i0} \ge K_{i0}+1, \\ x_j \ge 0 \ \ (j=\overline{1,n}). \end{cases}$$

Итак, для того, чтобы найти решение задачи ЦЧБП методом ветвей и границ необходимо: решить задачу (7); выявить нецелочисленные переменные; сформировать дополнительные ограничения для нецелочисленных переменных; решить задачи (I) и (II).

Продолжить итерационный процесс до тех пор, пока не будет найдено окончательное оптимальный целочисленной решение задачи (7).

Таким образом, в данной статье описана модель поиска наиболее приемлемого варианта распределения задач выведения космических аппаратов по элементам системы средств выведения. При этом максимизируется число успешно выполняемых задач выведения космических аппаратов при имеющихся ограничениях по надежности, стоимости и интенсивности выведения на заданном интервале планирования. Решаемая задача математически сформулирована как задача одномерного булевого целочисленного программирования. Описан алгоритм решения задачи. Модель может быть полезна при планировании запусков космических аппаратов, а также при обосновании требований к перспективной системе средств выведения.

iea.gostinfo.ru

Список использованных источников и литературы:

1. Левитан Е.П., Герасютин С.А. Современные ракеты-носители // Земля и Вселенная. – 2008. № 6.

2. Сизяков Н.П., Скориков Д.В. Анализ состояния и тенденций развития рынка космических услуг // Информация и космос, № 1, 2010.- С. 83-86.

3. Прогноз развития международного рынка коммерческих КА и пусковых услуг на период 2010-2017 годов аналитический отчет, ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», Москва.- 2009.

4. Пайсон Д.Б. Техническая политика создания космического сегмента спутниковых систем связи: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2007.

5. Поповкин В.А. Методический подход к решению задачи выбора параметров развития системы космического информационного обеспечения. Журнал «Двойные технологии», № 3 (48), с. 2-6, 2009.

6. Басотин Е.В., Миронов А.Н., Казаков Р.Р., Сизяков Н.П., Шестопалова О.Л. Определение потребности в модернизации составных частей ракетно-космических комплексов // Современные наукоемкие технологии. № 12 (часть 3), 2016. С. 486-490.

7. Басотин Е.В., Миронов А.Н., Казаков Руст.Р., Казаков Раф.Р., Шестопалова О.Л. Анализ путей решения проблемы управления жизненным циклом наземного оборудования ракетно-космических комплексов // Фундаментальные исследования. 2016. № 6-2. С. 282-287.

8. Чулков С.А., Кузин А.И., Лехов П.А., Семенов А.И. Сравнительный анализ путей реализации основных требований к перспективным средствам выведения // НТЖ «Авиакосмическая техника и технологии», 2008.

9. Сизяков Н.П., Шестопалова О.Л. Планирование поэтапной реализации инновационных программ развития комплексов космических средств в условиях неопределенности информации о временных, ресурсных и технологических ограничениях// Информация и космос, № 1, 2010.- С. 125-127.

10. Бережная Е.В. Бережной В.И. Методы и модели принятия управленческих решений [Текст]: учеб. пособие. - Москва : ИНФРА-М, 2014. - 384 с.

© Миронов А.Н.
© Сизяков Н.П.
© Шестопалова О.Л.

iea.gostinfo.ru