

УДК 629.7

## **МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ МНОГОСПУТНИКОВОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ ГРУППОВОЙ НАЗЕМНОЙ ЦЕЛИ**

**Гордеев А.В. (Санкт-Петербург)**

### **Введение**

Системный обзор современных направлений исследований в области возможных вариантов функционирования перспективных ОГ МКА ДЗЗ показывает, что основная особенность указанных систем состоит в том, что в них происходит качественные изменения в технологиях управления как отдельными МКА ДЗЗ, так и в целом ОГ МКА ДЗЗ. Эти изменения базируются на существенной трансформации и обновлении состава, структур и потенциальных возможностей аппаратно-программных комплексов, составляющих основу бортовых систем (БС) рассматриваемых МКА ДЗЗ [1, 2].

За счет этих изменений, а также использования режимов ретрансляционного межспутникового обмена данными и информацией в ближайшие годы может быть существенно повышен уровень автономности как отдельных МКА, так и в целом ОГ МКА. В этом случае возможен переход к технологиям сетевого управления МКА и ОГ МКА ДЗЗ.

Наряду с этим требуется обеспечить (исходя из базовой концепции самоорганизации, положенной в основу создаваемых ОГ МКА ДЗЗ) равномерность использования бортовых ресурсов как каждой отдельно взятой бортовой аппаратуры (БА), входящей в состав соответствующей БС отдельно взятого МКА, так и равномерность использования указанных ресурсов относительно аналогичных ресурсов других МКА, входящих в конкретную ОГ МКА. Таким образом, понятие «системные бортовые ресурсы», во-первых, имеет виртуальный характер и подобно понятию виртуальных информационных ресурсов, которое используется в информационно-вычислительной сфере, а, во-вторых, оно наполняется реальным содержанием и определяется текущим состоянием конкретных ресурсов БС МКА [3].

Из-за непредсказуемого потока заявок на выполнение съемок объектов наблюдения групповых целей нагрузка на каждый в отдельности МКА ДЗЗ при неправильной организации управления тоже будет распределяться неравномерно, что в конечном итоге на длительных интервалах времени может приводить к ухудшению общего целевого эффекта, создаваемого ОГ МКА ДЗЗ.

Анализ показывает, что исследование проблемы управления ОГ МКА ДЗЗ потребует в первую очередь целенаправленно учитывать энергопотребление бортовой аппаратуры и структурно-функциональную избыточность, тесно связанные с надежностью и живучестью функционирования БС МКА, а также предопределяются эффективностью решения задач маршрутизации [4]. Одной из основных задач такого типа является задача многокритериального планирования автономной маршрутизации ОГ МКА ДЗЗ по обслуживанию групповой цели.

**Постановка задачи многокритериального планирования автономной  
маршрутизации ОГ МКА ДЗЗ**

Применение многоспутниковой ОГ МКА ДЗЗ заключается в периодическом, либо оперативно-ситуационном планировании и выполнении заявок на съёмку тех или иных целевых районов (объектов) наблюдения (рис. 1).

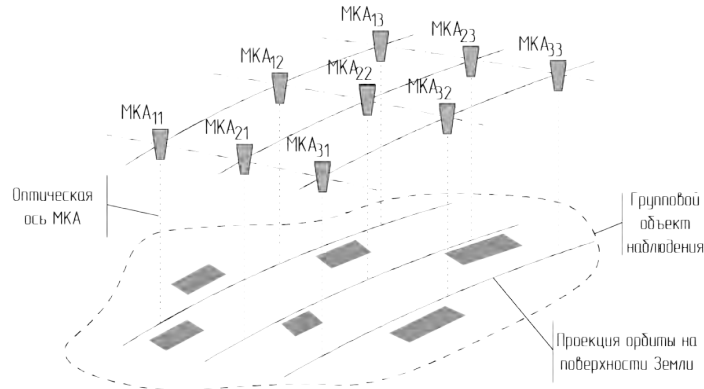


Рис. 1. Орбитальная группировка МКА ДЗЗ при обслуживании групповой цели

Для формализации задачи многокритериального планирования автономной маршрутизации ОГ МКА ДЗЗ введем основные базисные множества.

$B = \{b_v, v \in M\}, M = \overline{1, m}$  – множество МКА, входящих в состав ОГ, каждый МКА характеризуется  $b_v = \langle U_v^P, U_v^T, w_v^{перенац}, w_v^{съёмки}, \varphi_v, W_v, P_v \rangle$  ( $U_v^P$  – управляющее ускорение разгона МКА, создаваемое двигателями-маховиками СУД,  $U_v^T$  – управляющее ускорение торможения МКА, создаваемое двигателями-маховиками СУД,  $w_v^{перенац}$  – скорость расходования энергии при осуществление операции перенацеливания МКА,  $w_v^{съёмки}$  – скорость расходования энергии при осуществление операции съёмки объекта,  $\varphi_v$  – угол захвата целевой аппаратуры МКА,  $W_v$  – запас энергии на борту МКА,  $P_v$  – вероятность безотказной работы СУД при многорежимном функционировании).

$A = \{a_i, i \in N\}, N = \overline{1, n}$  – множество ОН групповой цели. При этом для каждого  $b_v, v \in M$  МКА  $a_i, i \in N$  ОН характеризуется кортежем  $\langle t_{vi}^h, t_{vi}^k, t_{vi}^o, \varphi_{vi}, \mu_{vi}, \alpha_i \rangle$  ( $t_{vi}^h$  – траверзное время начала ОН,  $t_{vi}^k$  – траверзное время конца ОН,  $t_{vi}^o$  – время обслуживания ОН,  $\varphi_{vi}$  – углы визирования ОН,  $\mu_{vi}$  – коэффициенты условий съёмки (время суток, погодные условия, наличие облачного покрова) ОН,  $\alpha_i$  – коэффициенты важности ОН, при этом  $t_{vi}^k = t_{vi}^h + t_{vi}^o, v \in M, i \in N$ ).

Для каждого  $b_v$  МКА введем фиктивные цели – «нулевую» с индексом «0»  $a_{v0}$ , предшествующую первой цели, и «финальную», следующую за конечной, с индексом  $n+1$   $a_{v(n+1)}$ . Следует отметить, что фиктивные цели соответственно соотносятся с моментами начала подготовки МКА ДЗЗ к режиму активного маневрирования и переходу в режим солнечной ориентации МКА ДЗЗ. Их траверзные времена рассчитываются по специальной методике с использованием результатов баллистического прогноза в процессе орбитального полёта на основании параметров

движения отдельно взятого МКА ДЗЗ. На рисунке 1 представлено схематичное представление групповой цели, после обработки указанных выше данных.

Кроме фиктивных ОН введем для каждого  $b_v$  МКА множество ОН групповой цели, попавших в его полосу обзора,  $A^v = \{a_i \in A \mid \varphi_{vi} \leq \varphi_v, i = \overline{1, n}\}$ ,  $v = \overline{1, m}$ , а также множества ОН, предшествующих текущей  $A_i^{v-} = \{a_j \in A^v \cup \{a_{v,0}\} \mid t_{vj}^H < t_{vi}^H\}$ ,  $i = \overline{1, n+1}$ ,  $v = \overline{1, m}$  и следующих за текущей  $A_i^{v+} = \{a_j \in A^v \cup \{a_{v(n+1)}\} \mid t_{vi}^H \leq t_{vj}^H\}$ ,  $i = \overline{0, n}$ ,  $v = \overline{1, m}$ .

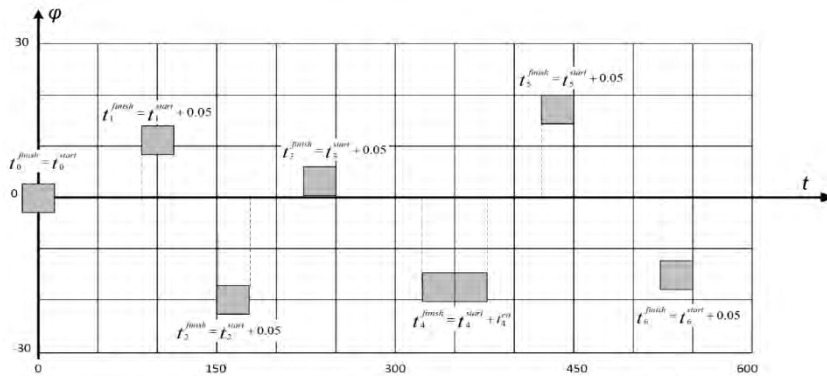


Рис. 2. Схематичное представление групповой цели обслуживания ОГ МКА

Для дальнейшей формализации задачи многокритериального планирования автономной маршрутизации ОГ МКА ДЗЗ введем следующие обозначения.

Под относительным углом визирования  $\forall b_v, v \in M$  будем понимать абсолютную разницу углов визирования между  $a_i$  ОН и  $a_j$  ОН:

$$\Delta\phi_{ij}^v = |\varphi_{vj} - \varphi_{vi}|, \forall a_i \in A^v \cup \{a_{v,0}\}, a_j \in A_i^{v+}.$$

Для определения длительности процесса перенацеливания  $\Delta\tau_{ij}^v \forall b_v, v \in M$  с  $a_i$  ОН на  $a_j$  ОН, воспользуемся следующей упрощенной формулой, исходя из стратегии оптимального по быстрдействию обслуживания целей

$$\Delta\tau_{ij}^v(\Delta\phi_{ij}^v) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2|\Delta\phi_{ij}^v|}{U_P^v + U_T^v}} \left( \sqrt{\frac{U_T^v}{U_P^v}} + \sqrt{\frac{U_P^v}{U_T^v}} \right), \text{ при } U_P^v \neq U_T^v \\ 2\sqrt{\frac{|\Delta\phi_{ij}^v|}{U^v}}, \text{ при } U_P^v = U_T^v = U^v \end{cases}, \quad (2)$$

где  $\forall a_i \in A^v \cup \{a_{v,0}\}, a_j \in A_i^{v+}$ .

Формула (2) получена синтезом оптимальной программы управления на основе решения краевой задачи и заключается в формировании системы алгебраических уравнений, описывающей все этапы знакопостоянства управляющего параметра с использованием решения задачи Коши [3].

Далее введем  $\forall b_v, v \in M$  МКА:

– верхнюю треугольную матрицу разности траверзных времен ОН

$$\Gamma^v = \|\Delta t_{ij}^v\|, \text{ где } \Delta t_{ij}^v = \begin{cases} t_{vj}^h - t_{vi}^k, \forall a_i \in A^v \cup \{a_{v0}\}, a_j \in A_i^{v+}; \\ 0, \text{ иначе} \end{cases};$$

– верхнюю треугольную матрицу относительных углов визирования ОН, рассчитанных по формуле (1):

$$\Phi^v = \|\Delta \phi_{ij}^v\|, \text{ где } \Delta \phi_{ij}^v = \begin{cases} |\phi_{vj} - \phi_{vi}|, \forall a_i \in A^v \cup \{a_{v0}\}, a_j \in A_i^{v+}; \\ 0, \text{ иначе} \end{cases};$$

– треугольную матрицу временных затрат, элементы которой рассчитаны по формуле (2)  $\forall a_i \in A^v \cup \{a_{v0}\}, a_j \in A_i^{v+}$ , в противном случае  $\Delta \tau_{ij}^v(\Delta \phi_{ij}^v) = 0$  и являются минимально необходимыми длительностями процессов перенацеливания с  $a_i$  ОН на  $a_j$  ОН при относительном угле визирования между ними  $\Delta \phi_{ij}^v$ :

$$\Xi^v = \|\Delta \tau_{ij}^v(\Delta \phi_{ij}^v)\|;$$

– треугольную булеву матрицу достижимости ОН  $\forall a_i \in A^v \cup \{a_{v0}\}, a_j \in A_i^{v+}$ , в противном случае  $\theta_{ij}^v = 0$ :

$$\Theta^v = \|\theta_{ij}^v : \theta_{ij}^v = \delta(\Delta t_{ij}^v - \Delta \tau_{ij}^v)\|, \text{ где}$$

$$\delta(\Delta t_{ij}^v - \Delta \tau_{ij}^v) = \begin{cases} 1, \text{ при } \Delta t_{ij}^v \geq \Delta \tau_{ij}^v \\ 0, \text{ при } \Delta t_{ij}^v < \Delta \tau_{ij}^v \end{cases} - \text{единичная функция Хевисайда.}$$

Следует отметить, что матрицы  $\Theta^v, v \in M$  достижимости целей сконцентрировали в себе всю необходимую информацию для формирования допустимых вариантов маршрутов обхода целей [5].

Тогда вариант маршрута обхода ОН ОГ МКА ДЗЗ обозначим матрицей булевых переменных  $X = \|x_{vij}\|, v = \overline{1, m}, i = \overline{0, n}, j = \overline{1, n+1}$ , где  $x_{vij} = 1$ , если для  $b_v$  МКА переход из  $a_i$  (в частности, из  $a_{v0}$ ) ОН в  $a_j$  (в частности, в  $a_{v(n+1)}$ ) ОН включен в маршрут, 0 в противном случае.

Для формализации области допустимых вариантов маршрута обхода ОН групповой цели  $\Delta_\beta$  введем следующие ограничения:

– на маршруте обхода  $\forall b_v, v \in M$  в каждый ОН один вход и один выход

$$\sum_{a_i \in A_k^{v-}} x_{vik} - \sum_{a_j \in A_k^{v+}} x_{vkj} = 0, v = \overline{1, m}; k = \overline{1, n};$$

– условие допустимости включения ОН в маршрут

$$\theta_{ij}^v - x_{vij} \geq 0, v = \overline{1, m}; i, j = \overline{0, n+1};$$

– условие включения ОН в маршрут не более одного раза

$$\sum_{v=1}^m \sum_{a_i \in A_k^{v-}} x_{vik} \leq 1, k = \overline{1, n}; \\ \sum_{v=1}^m \sum_{a_j \in A_k^{v+}} x_{vkj} \leq 1, k = \overline{0, n};$$

– требование включения в любой маршрут фиктивных ОН:

$$\sum_{i=1}^{n+1} x_{\nu 0i} = 1, \sum_{j=0}^n x_{\nu j(n+1)} = 1, \nu = \overline{1, m}.$$

Далее введём показатели суммарной значимости обслуживаемых ОН с учетом коэффициентов важности ОН, условий съемки ОН и вероятности безотказной работы

$$\text{СУД при многорежимном функционировании } F_0(X) = \sum_{\nu=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=i+1}^{n+1} \alpha_j \cdot \mu_{\nu j} \cdot P_{\nu} \cdot x_{\nu ij}$$

$$\text{и энергопотребления } F_{\nu}(X) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=i+1}^{n+1} \lambda_{\nu ij} \cdot x_{\nu ij} \quad \text{каждого } b_{\nu}, \nu \in M \text{ МКА при}$$

обслуживании групповой цели.

Здесь

$$\lambda_{\nu ij} = \begin{cases} \Delta \tau_{ij}^{\nu} \cdot w_{\nu}^{\text{перенац}} + (t_{\nu j}^k - t_{\nu j}^n) \cdot w_{\nu}^{\text{съёмки}}, & a_i \in A^{\nu} \cup \{a_{\nu 0}\}, a_j \in A_i^{\nu+}, \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}, \nu = \overline{1, m}$$

коэффициент энергопотребления при перенацеливании с одного объекта на другой и его съемку  $b_{\nu}, \nu \in M$  МКА.

Таким образом, задача многокритериального планирования маршрута обхода объектов групповой цели ОГ МКА ДЗЗ выглядит следующим образом:

$$\max_{X \in \Delta_{\beta}} F_0(X), \min_{X \in \Delta_{\beta}} F_1(X), \dots, \min_{X \in \Delta_{\beta}} F_m(X).$$

Следует отметить, что для равномерного использования системных энергоресурсов ОГ МКА ДЗЗ целесообразно учитывать предысторию функционирования МКА (наличие энергоресурса МКА на момент начала планирования  $W_{\nu}, \nu = \overline{1, m}$ ) и максимизировать общую для всех МКА ОГ нижнюю грань ( $\nu \rightarrow \max$ )

$$\text{остатка энергоресурсов } W_{\nu} - \sum_{i=0}^n \sum_{j=i+1}^{n+1} \lambda_{\nu ij} \cdot x_{\nu ij} \geq \nu. \quad \text{Это позволит свести}$$

многокритериальную задачу (11) к двухкритериальной задаче (12):

$$\sum_{\nu=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=i+1}^{n+1} \alpha_j \cdot \mu_{\nu j} \cdot P_{\nu} \cdot x_{\nu ij} \rightarrow \max_{X \in \Delta}, \nu \rightarrow \max_{X \in \Delta},$$

$$\text{где } \Delta = \Delta_{\beta} \cap \{W_{\nu} - \sum_{i=0}^n \sum_{j=i+1}^{n+1} \lambda_{\nu ij} \cdot x_{\nu ij} \geq \nu, \nu = \overline{1, m}\}, \nu \geq 0.$$

Для разрешения критериальной неопределенности в задаче (12) в первую очередь построим множество недоминируемых планов обслуживания групповой цели, равномерно расположенных в области компромиссов (множестве паретовских решений), с использованием метода уступок [6–8]. Показатель  $F_0$  в области допустимых решений может принимать следующие крайние значения:

$$F_{0\max} = \sum_{j=1}^n a_j \cdot \max_{v=1,\dots,m} \{\mu_{vj} \cdot P_v\}, \quad F_{0\min} = 0 \quad (12)$$

где  $F_{0\min}$  соответствует такому варианту обхода ОН, при котором не обслужен ни один ОН, соответственно  $F_{0\max}$  оценка идеального варианта, при котором обслужены все ОН. Для формирования не более заданного лицом, принимающим решение (ЛПР), числа  $k_{\text{зад}}$  паретовских решений из области компромиссов  $\Delta^{nd}(k_{\text{зад}})$ , введем уступку  $\varepsilon = \frac{F_{0\max}}{k_{\text{зад}}}$  и решим серию задач  $l = 1, \dots, k_{\text{зад}}$  вида (14):

$$v \rightarrow \max_{X \in \Delta_l} \quad (14)$$

где

$$\Delta_l = \Delta_\beta \cap \left\{ W_v - \sum_{i=0}^n \sum_{j=i+1}^{n+1} \lambda_{vij} \cdot x_{vij} \geq v, v = \overline{1, m}, \sum_{v=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=i+1}^{n+1} \alpha_j \cdot \mu_{vj} \cdot P_v \cdot x_{vij} \leq l \cdot \varepsilon, v \geq 0 \right\}$$

После построения множества  $\Delta^{nd}(k_{\text{зад}})$  для дальнейшего преодоления критериальной неопределенности воспользуемся комбинированным методом построения псевдоуниверсальной (аддитивно-мультипликативной) свертки, в основе которого лежат метод теории планирования экспериментов и продукционные модели представления экспертных знаний [7, 11].

Пусть показатели  $F_0$  и  $v$  представлены лингвистическими переменными. Например,  $F_0 =$  «суммарная значимость обслуживаемых ОН» может принять значения из простых и составных термов  $T(F_0) = \{\text{«низкий»}, \text{«ниже среднего»}, \text{«средний»}, \text{«выше среднего»}, \text{«высокий»}\}$ , а показатель  $v =$  «остаток энергоресурсов» принимает значения из множества  $T(v) = \{\text{«низкий»}, \text{«ниже среднего»}, \text{«средний»}, \text{«выше среднего»}, \text{«высокий»}\}$  [12, 13].

Тогда согласно разработанному методу знания экспертов для ранжирования планов обслуживания групповой цели следует представить продукционными правилами:

$$Q_s : \text{ЕСЛИ } F_0 = A_{0s} \text{ И } v = A_{vs} \text{ ТО } F_{\text{рез}} = A_{\text{рез}s}, \quad \text{где}$$

$$A_{0s} \in T(F_0), A_{vs} \in T(v), A_{\text{рез}j} \in T(F_{\text{рез}})$$

Термы  $A_{0s}, A_{vs}$  можно задать нечеткими числами ( $L-R$ ) типа. Тогда значения показателей количественно можно представить, как на рис. 3.

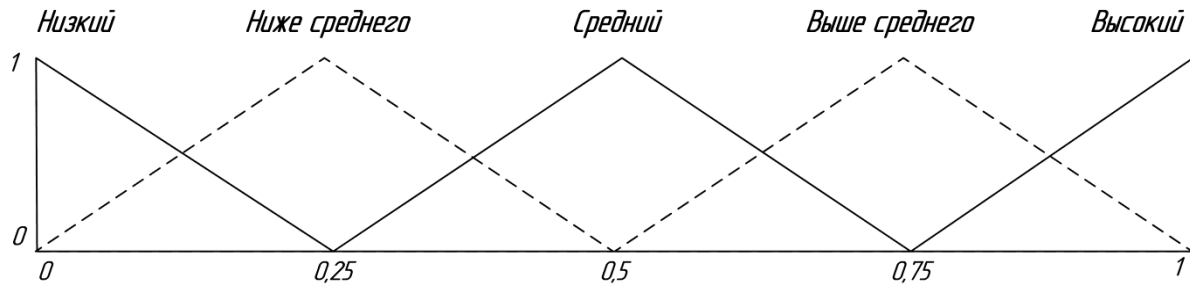


Рис. 3. Термы лингвистической переменной

Для построения результирующего показателя необходимо перевести значения показателей  $F_0$  и  $\nu$  в шкалу  $[-1, +1]$ . Крайние значения лингвистических переменных  $F_0$  и  $\nu$  порядковой шкалы маркируют  $-1$  и  $+1$ , при этом точка «0» соответствует лингвистическому определению середины шкалы согласно физическому смыслу данного показателя [9]. Расчет коэффициентов полинома производится по правилам, принятым в теории планирования экспериментов, для чего вычисляются усредненные скалярные произведения соответствующих столбцов ортогональной матрицы на вектор деффазилируемых значений результирующего показателя. Полученные результаты приведены ниже в табл. 1.

Таблица 1

F0	F1	F2	F1*F2	Fрез
1	-1	-1	1	0.00015
1	1	-1	-1	0.5
1	-1	1	-1	0.15
1	1	1	1	1
F0*Fрез	F1*Fрез	F2*Fрез	F1*F2*Fрез	
0.00015	-0.00015	-0.00015	0.00015	
0.5	0.5	-0.5	-0.5	
0.15	-0.15	0.15	-0.15	
1	1	1	1	
$\lambda_0$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_{12}$	
0.412538	0.337463	0.162463	0.087538	

Таким образом, свертка показателей в нашем случае имеет следующий вид

$$F_{рез} = 0,412538 + 0,337463 \cdot F + 0,162463 \cdot \nu + 0,087538 \cdot F \cdot \nu$$

и критерий выбора планов обслуживания групповой цели принимает вид

$$0,412538 + 0,337463 \cdot F + 0,162463 \cdot \nu + 0,087538 \cdot F \cdot \nu \rightarrow \max_{\Delta^{nd}(k_{зад})} \quad (14)$$

и позволит осуществить ранжировку вариантов из множества  $\Delta^{nd}(k_{зад})$  для окончательного принятия решения с учетом знаний эксперта.

### Результаты экспериментов

Для построения основных базисных множеств при решении задачи обслуживания групповой цели применено имитационное моделирование процесса движения центра масс и подспутниковых точек МКА ДЗЗ [14, 15], в ходе которого

определяются взаимные положения ОН и МКА в различные моменты времени и углы визирования ОН относительно траверза движения каждого МКА из состава ОГ.

Технические характеристики для баллистических расчётов и построения маршрутов обхода ОН групповой цели взяты из описания МКА ДЗЗ [10]. При проведении вычислительных экспериментов использовались характеристики целевой аппаратуры детального наблюдения за поверхностью Земли.

Под «фиктивными целями» следует понимать две точки проекции оптической оси МКА на Землю. Одна в момент перехода из солнечной ориентации в трехосную стабилизацию, которая необходима для проведения съёмки земной поверхности, другая в момент перехода в солнечную ориентацию после завершения съёмки земной поверхности.

Пусть групповая цель состоит из 8 ОН, а ОГ МКА ДЗЗ из 2 КА. В результате обработки баллистических данных получены основные базисные множества (табл. 2).

Таблица 2

Основные базисные множества

Наименование	Обозначение	Значение
Множество ОН (значение их значимости)	A	[0, 1, 2, 3, 1, 3, 5, 5, 9, 0],
Вероятность безотказной работы СУД МКА	KA <sub>0</sub>	0.9873
	KA <sub>1</sub>	0.97881
коэффициенты условий съёмки $\mu$	KA <sub>0</sub>	[0.98, 0.978, 0.9451, 0.9451, 0.9861, 0.91, 0.991, 0.991, 0.9981, 0.91]
	KA <sub>1</sub>	[0.91, 0.991, 0.991, 0.9981, 0.91, 0.98, 0.978, 0.9451, 0.9451, 0.9861]
Матрица достижимости $\Theta$	KA <sub>0</sub>	[0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
	KA <sub>1</sub>	[0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Матрица затрат энергоресурса $\Delta$	KA <sub>0</sub>	[ 0, 180.24, 213.60, 255.60, 436.80, 238.80, 274.80, 138.59, 338.40, 120], [ 0, 0, 188.31, 230.40, 462, 264, 249.60, 177.30, 313.20, 180.24], [ 0, 0, 0, 198, 494.40, 296.40, 217.20, 211.20, 280.80, 213.60], [ 0, 0, 0, 0, 536.40, 338.40, 172.58, 253.20, 238.80, 255.60], [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 354, 555.60, 439.20, 436.80], [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 357.60, 241.20, 238.80], [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 272.40, 274.80], [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 336, 138.59], [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 338.40], [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
	KA <sub>1</sub>	[ 0, 180.24, 213.60, 255.60, 436.80, 238.80, 274.80, 138.59, 338.40, 120], [ 0, 0, 188.31, 230.40, 462, 264, 249.60, 177.30, 313.20, 180.24], [ 0, 0, 0, 198, 494.40, 296.40, 217.20, 211.20, 280.80, 213.60], [ 0, 0, 0, 0, 536.40, 338.40, 172.58, 253.20, 238.80, 255.60], [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 354, 555.60, 439.20, 436.80], [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 357.60, 241.20, 238.80], [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 272.40, 274.80], [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 336, 138.59], [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 338.40], [ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]



В результате решения частных оптимизационных задач (14) построено множество парето-оптимальных решений, каждое из которых оценено с использованием показателя (15). Полученные решения представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Результат вычислительного эксперимента

Вариант плана обслуживания групповой цели			Суммарная значимость обслуживаемых ОН	Остаток энергоресурса	Перекодированные значения в шкале [-1,1]		Значение результирующего полинома
№	КА <sub>0</sub>	КА <sub>1</sub>			Суммарная значимость	Остаток энергоресурса	
1.	0, 6, 8, 9	0, 5, 7, 9	21.263957	305.6	0.4665	-0.236	0.522
2.	0, 3, 6, 8, 9	0, 5, 7, 9	24.063248	152.22	0.6595	-0.6195	0.4987
3.	0, 3, 6, 8, 9	0, 1, 5, 7, 9	25.033249	114.56	0.7264	-0.7136	0.4964
4.	0, 5, 7, 9	0, 3, 6, 8, 9	23.630292	152.22	0.6297	-0.6195	0.4902
5.	0, 3, 6, 8, 9	0, 2, 5, 7, 9	26.00325	48.8	0.7933	-0.878	0.4766
6.	0, 7, 9	0, 6, 8, 9	18.004112	305.6	0.2417	-0.236	0.4508
7.	0, 8, 9	0, 3, 6, 9	16.586049	371.82	0.1439	-0.0705	0.4488
8.	0, 1, 8, 9	0, 3, 6, 9	17.551628	306.56	0.2105	-0.2336	0.4413
9.	0, 8, 9	0, 1, 7, 9	14.464185	442.46	-0.0025	0.1061	0.4289
10.	0, 8, 9	0, 2, 7, 9	15.434185	375.2	0.0644	-0.062	0.4239
11.	0, 8, 9	0, 6, 9	13.655198	461.6	-0.0583	0.154	0.4171
12.	0, 8, 9	0, 6, 9	13.655198	461.6	-0.0583	0.154	0.4171
13.	0, 7, 9	0, 8, 9	13.217731	461.6	-0.0884	0.154	0.4065
14.	0, 7, 9	0, 8, 9	13.217731	461.6	-0.0884	0.154	0.4065
15.	0, 7, 9	0, 6, 9	9.6784524	525.2	-0.3325	0.313	0.3421
16.	0, 7, 9	0, 5, 9	7.7697729	561.2	-0.4642	0.403	0.305
17.	0, 2, 9	0, 7, 9	6.4915611	586.4	-0.5523	0.466	0.2793
18.	0, 7, 9	0, 1, 9	5.8620722	619.76	-0.5957	0.5494	0.2721
19.	0, 7, 9		4.8920715	661.41	-0.6626	0.6535	0.2572
20.		0, 7, 9	4.6253667	661.41	-0.681	0.6535	0.2499

Решения ранжированы с учетом экспертных знаний в порядке убывания значения полинома свертки показателей (14). Наиболее предпочтительное решение задачи обслуживания ОН групповой цели ОГ МКА ДЗЗ представлено вариантом, при котором КА<sub>1</sub> обслуживает ОН с номерами 6, 8, а КА<sub>2</sub> соответственно 5, 7 (вариант №1 в таблице 5). ОН с индексами 2, 3, 4 в обработку не взяты.

### Заключение

В статье приведена формализация задачи многокритериального выбора вариантов обслуживания ОН групповой цели многоспутниковой ОГ МКА ДЗЗ. Одним из наиболее эффективных способов обоснования решений данной задачи является комбинированное аналитико-имитационное моделирование, которое позволяет объединить достоинства аналитического и имитационного моделирования. При этом для преодоления критериальной неопределенности, вызванной наличием группы

показателей, отражающих энергетические затраты МКА, и показателем, отражающим эффективность выполнения целевой задачи, а также для равномерного задействования ОГ МКА предложено операторное решающее правило перевода исходной задачи многокритериального выбора к двухкритериальной задаче. Суть данного правила состоит в том, что оптимальное решение максимизирует общую нижнюю грань относительных отклонений от оптимальных решений по частным показателям энергетических затрат. Далее, применив метод уступок (интервальной лексикографический метод построения результирующего отношения предпочтения), построено множество паретовских планов обслуживания групповой цели, равномерно расположенных в области компромиссов двухкритериальной задачи выбора. С целью ранжирования полученных решений множества Парето с учетом знаний (дополнительной информации) от лица, принимающего решение, предложен комбинированный метод, включающий метод планирования экспериментов и моделей представления знаний продукционного типа. Приведен пример, демонстрирующий возможности практической реализации разработанного подхода.

### Литература

1. Балухто А.Н. Технологии искусственного интеллекта в управлении многоспутниковыми группировками / А.Н. Балухто, С.А. Матвеев, М.М. Матюшин и др. // Космонавтика и ракетостроение. 2020. Вып. 3. С. 64–73.
2. Sinha P., Dutta A. Multi-Satellite Task Allocation Algorithm for Earth Observation // 2016 IEEE Region 10 Conference. 2016.
3. Мануйлов Ю.С. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления: учебник / Ю.С. Мануйлов, В.Н. Калинин, В.С. Гончаревский и др.; ред. Ю.С. Мануйлов. Санкт-Петербург: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2010. 609 с.
4. Викторovich М.О. Человек и системы искусственного интеллекта в военном деле / М.О. Викторovich, А.Ф. Камилович, Б.С. Анатольевич и др. // Военная мысль. 2021. № 6. С. 46–56.
5. Мануйлов Ю.С. Метод и алгоритм оптимального автономного целераспределения на борту космического аппарата наблюдения / Ю.С. Мануйлов, В.В. Яценко. 2005. МО РФ. № 23. С. 31–53.
6. Павлов А.А. Комбинированный метод многокритериального выбора управленческих решений на основе моделей представления знаний и планирования эксперимент / А.А. Павлов, А.Н. Павлов, Д.А. Павлов и др. // Труды Военно-Космической академии имени А.Ф. Можайского. 2017. № 656. С. 9–17.
7. Ногин В.Д. Проблема сужения множества Парето: подходы к решению / В.Д. Ногин // Искусственный интеллект и принятие решений. 2008. Проблема сужения множества Парето. № 1. С. 98–112.
8. Павлов А.Н. Метод структурно-параметрического синтеза конфигураций многорежимного объекта / А.Н. Павлов, Д.А. Павлов, А.Б. Умаров и др. // Информатика и автоматизация. 2022. № 4, т. 21. С. 812–845.
9. Pavlov A.N. Methodology of Structural–Functional Synthesis for the Small Spacecraft Onboard System Appearance / A.N. Pavlov, Valentin.N. Vorotyagin, D.A. Pavlov et al. // Stability and Control Processes / eds. N. Smirnov, A. Golovkina. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 687–694.
10. Кирилин А.Н. Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д» / А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов, Е. В. Шахматов и др. СамНЦ РАН, 2017. с.
11. Микони С.В. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов / С.В. Микони, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. М.: Российская академия наук, 2018. 314 с.

12. Москвин Б.В. Теория принятия решений: учебник. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. 383 с.

13. Pavlov A.N. The Technique of Multi-criteria Decision-Making in the Study of Semi-structured Problems / A.N. Pavlov, D.A. Pavlov, A.A. Pavlov et al. // *Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems: Advances in Intelligent Systems and Computing* / eds. R. Silhavy et al. Cham: Springer International Publishing, 2017. P. 131–140.

14. Сомова Т.Е. Применение имитации и анимации для полетной поддержки систем управления информационных спутников // *Проблемы управления*. 2014. № 5. С. 70–78.

15. Козлов Е.Р. Математическое моделирование движения КА // *Аллея науки*. 2021. Т. 1, № 6(57). С. 328–334. EDN SEPWFV.