

УДК: 519.816

DOI: 10.53816/23061456\_2021\_7-8\_21

**МЕТОД КООРДИНАЦИОННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕДИНЁННОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ  
ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАБЛЮДЕНИЯ**  
**METHOD OF COORDINATION PLANNING OF THE FUNCTIONING  
OF THE JOINT ORBITAL GROUP OF OBSERVING SPACECRAFT**

*Канд. техн. наук С.Х. Зиннуров<sup>1</sup>, канд. техн. наук О.Л. Куваев<sup>1</sup>, А.Н. Глуздов<sup>2</sup>*

*Ph.D. S.Kh. Zinnurov, Ph.D. O.L. Kuvaev, A.N. Gluzdov*

*<sup>1</sup>ВКА им. А.Ф. Можайского, <sup>2</sup>в/ч 67405*

В статье предложен метод координационного планирования функционирования объединенной орбитальной группировки космических аппаратов оптикоэлектронного и радиолокационного наблюдения. Предлагаемый метод основан на математическом аппарате теории многоуровневых иерархических систем и представляет собой четырехэтапную процедуру поиска рационального координированного плана применения орбитальной группировки космических аппаратов наблюдения, позволяющего повысить вероятность решения задачи наблюдения заданной группы объектов. В качестве оптимизационного алгоритма с организацией вычислительного процесса используется алгоритм, основанный на алгоритме Данцига-Вульфа. Данный алгоритм учитывает иерархическую структуру системы и координирующего решения в подсистемах на основе введения соответствующих координирующих сигналов. Это позволяет интерпретировать вычислительный процесс как процесс на основе модификации целевой функции с использованием механизма цен.

**Ключевые слова:** координационное планирование, орбитальная группировка, многоуровневая иерархическая система, планирование функционирования.

The article proposes a method for coordinating planning of the functioning of the joint orbital constellation of optical-electronic and radar observation spacecraft. The proposed method is based on the mathematical apparatus of the theory of multilevel hierarchical systems and is a four-stage procedure for finding a rational coordinated plan for the use of an orbital constellation of observation spacecraft, which makes it possible to increase the probability of solving the problem of observing a given group of objects. An algorithm based on the Danzig-Wulf algorithm used as an optimization algorithm with the organization of the computational process. This algorithm takes into account the hierarchical structure of the system and the coordinating solution in the subsystems based on the introduction of appropriate coordinating signals. This allows us to interpret the computational process as a process based on the modification of the objective function using the price mechanism.

**Keywords:** coordination planning, orbital grouping, multilevel hierarchical system, functional planning.

## Введение

Одним из актуальных направлений развития в области дистанционного зондирования Земли является объединение орбитальной группировки (ОГ) космических аппаратов (КА) оптико-электронного (ОЭ) и радиолокационного (РЛ) наблюдения, принадлежащих различным заказчикам целевого функционирования (ЗЦФ) или союзным государствам, в единую орбитальную группировку [1, 2]. Перспективность данного направления обусловлена:

- увеличением количества космических систем и комплексов наблюдения в развитых государствах, имеющих различных заказчиков целевого функционирования;

- увеличением количества государств, имеющих на орбите свои КА наблюдения;

- возрастанием спроса на информацию, получаемую от космических аппаратов наблюдения (КАН), со стороны коммерческих организаций, а также государственных структур и ведомств большинства стран мира;

- возможностью повышения полноты и качества информации за счет интеграции данных, поступающих от КА различного типа [3, 4].

В целях получения системного эффекта от функционирования объединенной ОГ КАН требуется создание специального центра (координатора), решающего следующие задачи: сбор заявок от ЗЦФ КАН на получение данных об интересующих их объектах наблюдения и частных планов функционирования ОГ КАН, находящихся в ведении ЗЦФ КАН, координационное планирование функционирования объединенной ОГ КАН, сбор информации наблюдения из пунктов приема целевой информации от КАН, обработка и выдача данных наблюдения ЗЦФ КАН.

Результаты анализа научного задела в области планирования функционирования ОГ КАН показывают, что большинство существующих подходов ориентировано на планирование функционирования отдельных КАН [5–8] или групп КАН, обладающих схожими параметрами бортовой целевой аппаратуры [9–12]. Однако применение указанных подходов к планированию функционирования объединенной ОГ КАН, составленной из групп КАН, имеющих разную бортовую специальную аппаратуру и управляемых из различных центров управления полета-

ми (ЦУП), не представляется возможным. Данное обстоятельство обуславливает актуальность предлагаемой работы.

## Формализация задачи координационного планирования функционирования объединенной орбитальной группировки

Совокупность групп КАН, объединяемых в единую ОГ, целесообразно представить как объединенную космическую систему, структура которой и основные информационные потоки представлены на рис. 1.

Результаты анализа содержания и направлений основных информационных потоков в объединенной космической системе показали, что ее удобно представить в виде многоуровневой иерархической системы (рис. 2).

При этом отдельные блоки изображают подсистемы, осуществляющие планирование операций функционирования групп однотипных КА, а их взаимное расположение отражает иерархическую структуру всей системы. Система, изображенная на рис. 2 имеет  $N + M + 1$  основных подсистем:

- подсистема верхнего уровня или Координатор  $\Pi_0$ , решающая задачу  $Z_0$  — задачу планирования функционирования многоспутниковой ОГ;

- $N$  подсистем первого уровня  $\Pi^1 \dots \Pi^N$ , каждая из которых решает задачу планирования функционирования разнотипных групп КАН  $Z^1 \dots Z^N$ ;

- $M$  подсистемы третьего уровня  $\Pi^1 \dots \Pi^N$ , каждая из которых решает задачу планирования функционирования КАН одного типа  $Z^1 \dots Z^N$ .

В системе (рис. 2) осуществляется два вида вертикального взаимодействия между подсистемами.

Первый (представлен неразрывными линиями) отображает передачу вниз от управляющих подсистем к управляемым координирующим сигналам  $u^1 \dots u^N, u_1^1 \dots u_M^N$ .

Второй (представлен пунктирными линиями) отображает передачу вверх от управляемых подсистем к управляющим информационным сигналам  $w^1 \dots w^N, w_1^1 \dots w_M^N$ .

В качестве показателя эффективности функционирования КАН целесообразно выбрать вероятность распознавания состояния объекта на-

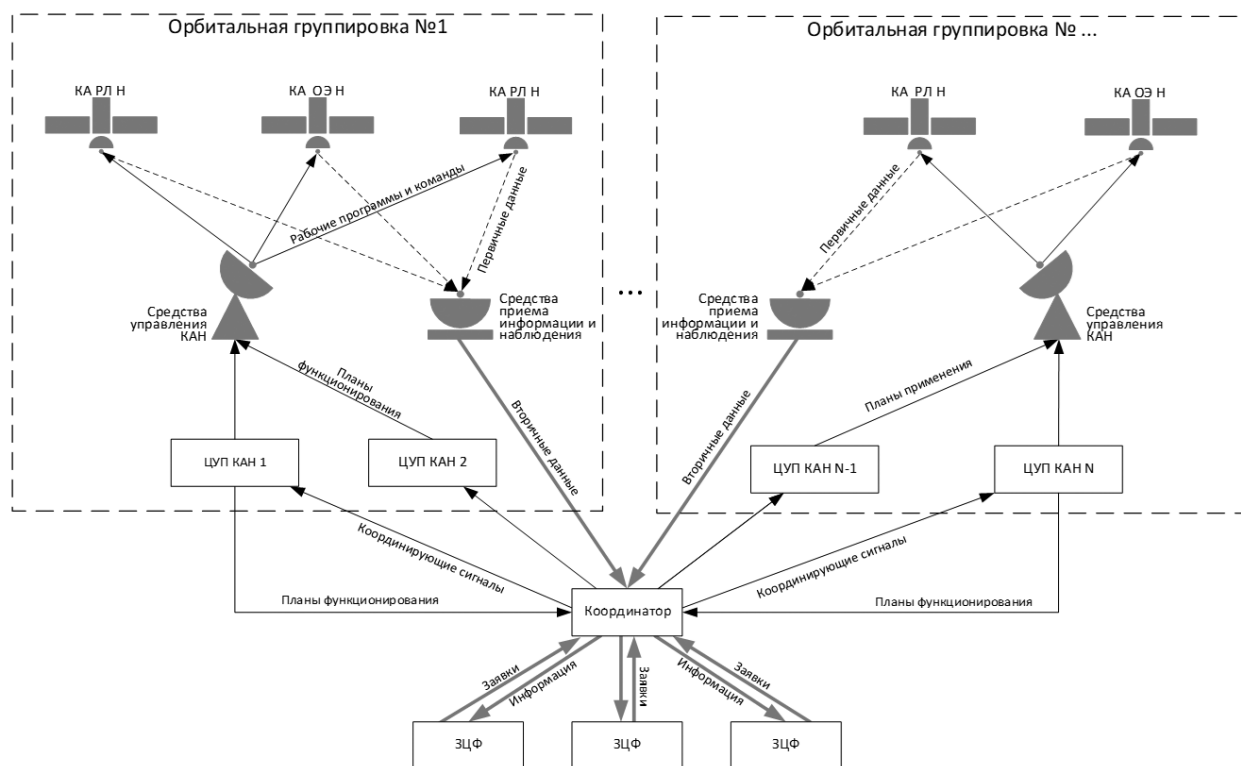


Рис. 1. Структурная схема объединенной космической системы



Рис. 2. Иерархия объединенной космической системы

блюдения  $P_{КАН}$ , примеры расчета которого рассмотрены в [13, 14]. Каждый из КАН решает задачу наблюдения наземных объектов с определенной вероятностью распознавания состояния объекта  $P_{КАН}$ , зависящей от многих факторов, таких как метеобстановка в районе наблюдения, времени суток наблюдения, характеристики бортовой целевой аппаратуры и др. Исходя из этого, при использовании объединенной космической системы, вероятность распознавания состояния

объекта наблюдения может быть определена в соответствии с выражением [13]

$$P_{ОКС} = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - P_{КАН_i})^a,$$

где  $P_{ОКС}$  — вероятность распознавания состояния объекта наблюдения объектом объединенной космической системой;  $P_{КАН_i}$  — вероятность распознавания состояния объекта наблюдения

$i$ -м КАН,  $i=1..I$ ,  $I$  — количество КАН, наблюдающих объект;  $\alpha$  — количество наблюдений объекта  $i$ -м КАН на интервале времени  $T$ .

Результаты анализа планов функционирования групп КАН управляемых различными ЦУП показали, что в ходе раздельного планирования возможно возникновение «конфликтных ситуаций», заключающихся как в пропуске объектов, требующих наблюдения, так и назначении на съемку одного объекта нескольких космических аппаратов, осуществляющих наблюдение с качеством большим, чем того требует необходимость.

Разрешение таких ситуаций возможно за счет координации планов функционирования частных групп КАН, осуществляемой с целью достижения общей цели.

Таким образом, задача координационного планирования функционирования объединенной ОГ, состоящей из КА различного целевого назначения, может быть представлена в следующем виде.

Дано:

1) объединенная ОГ, состоящая из множества КАН —  $\mathbf{A} = \{a_i\}$ ,  $i=1..I$ , где  $a_i = \langle h, \mathbf{V}, \mathbf{r}, q, \mathbf{L}, c \rangle$ ,  $h$  — признак принадлежности к ОГ,  $h=1..H$ ,  $H$  — общее количество объединяемых ОГ,  $\mathbf{V}$  — вектор скорости КАН,  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор КАН,  $q$  — емкость, запоминающего устройства КАН,  $\mathbf{L}$  — вектор характеристик бортовой целевой аппаратуры КАН,  $c$  — признак КАН (1 — ОЭ наблюдения, 2 — РЛ наблюдения);

2) множество точечных объектов наблюдения —  $\mathbf{B} = \{b_j\}$ ,  $j=1..J$ , где  $b_j = \langle P_{\min}, \psi, \varphi, \gamma, \mathbf{e} \rangle$ ,  $P_{\min}$  — минимальные требования потребителя к значению вероятности распознавания состояния объекта,  $\psi$  — показатель, характеризующий значимость объекта наблюдения,  $\varphi, \gamma$  — долгота и широта расположения объекта наблюдения на Земной поверхности,  $\mathbf{e}$  — вектор, характеризующий параметры объекта наблюдения (линейные размеры, спектральные характеристики и др.);

3) интервал времени на котором осуществляется планирование функционирования ОГ КАН —  $T = [t_0, t_f]$ .

Тогда множество планов функционирования объединенной ОГ КАН удобно представить, как множество  $\Omega = A \times B \times T = \{\Omega_k, k=1..K\}$ , в котором отдельный план  $\Omega_k = (\omega_{ijt})$ ,  $\omega_{ijt} = 1$ , если  $i$ -й КАН производит съемку  $j$ -го объекта наблю-

дения в момент времени  $t$ ,  $\omega_{ijt} = 0$  в противном случае.

Качество планирования функционирования объединенной ОГ КАН предлагается оценивать с использованием показателя  $S = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \omega_{ijt} \psi_j$ , который характеризует полноту информации, получаемой об объектах наблюдения в результате функционирования объединенной ОГ КАН.

Требуется: построить план функционирования ОГ КАН  $\Omega^*$ , обеспечивающий наблюдение максимального количества точечных объектов  $\mathbf{B}$ , для которых выполняются требование по вероятности распознавания состояния объектов наблюдения  $P_{\text{ОКС}} \geq P_{\min j}$

$$\Omega^* = \operatorname{argmax}_{\Omega_k \in \Omega} \{S(\Omega_k) | P_{\text{ОКС}}(\Omega_k) \geq P_{\min}\}.$$

### Описание метода

Для решения задачи координационного планирования функционирования объединенной орбитальной группировки КАН разработан метод, структурно-логическая схема которого представлена на рис. 3.

Метод включает в себя четыре основных этапа.

На первом этапе на основе исходных данных о местоположении множества объектов наблюдения и положении КАН в момент времени  $t_0$  осуществляется моделирование движения и расчет пространственно-временных характеристик взаимодействия КА с объектами наблюдения, которые позволяют сформировать исходный план функционирования каждого КАН  $\omega_i, i=1..I$  (рис. 4). Исходный план включает в себя все объекты наблюдения, попадающие в зону обзора КАН и формируется без учета ограничений на работу бортовой целевой аппаратуры.

Также на этапе для каждой пары «КАН-точечный объект» осуществляется расчет вероятности распознавания состояния объекта  $P_{\text{КАН}ij}$ .

На втором этапе метода осуществляется формирование частных планов функционирования групп однотипных КАН, обеспечивающих охват наибольшего числа значимых объектов наблюдения.

При построении плана функционирования для каждого  $i$ -го КАН учитываются ограничения

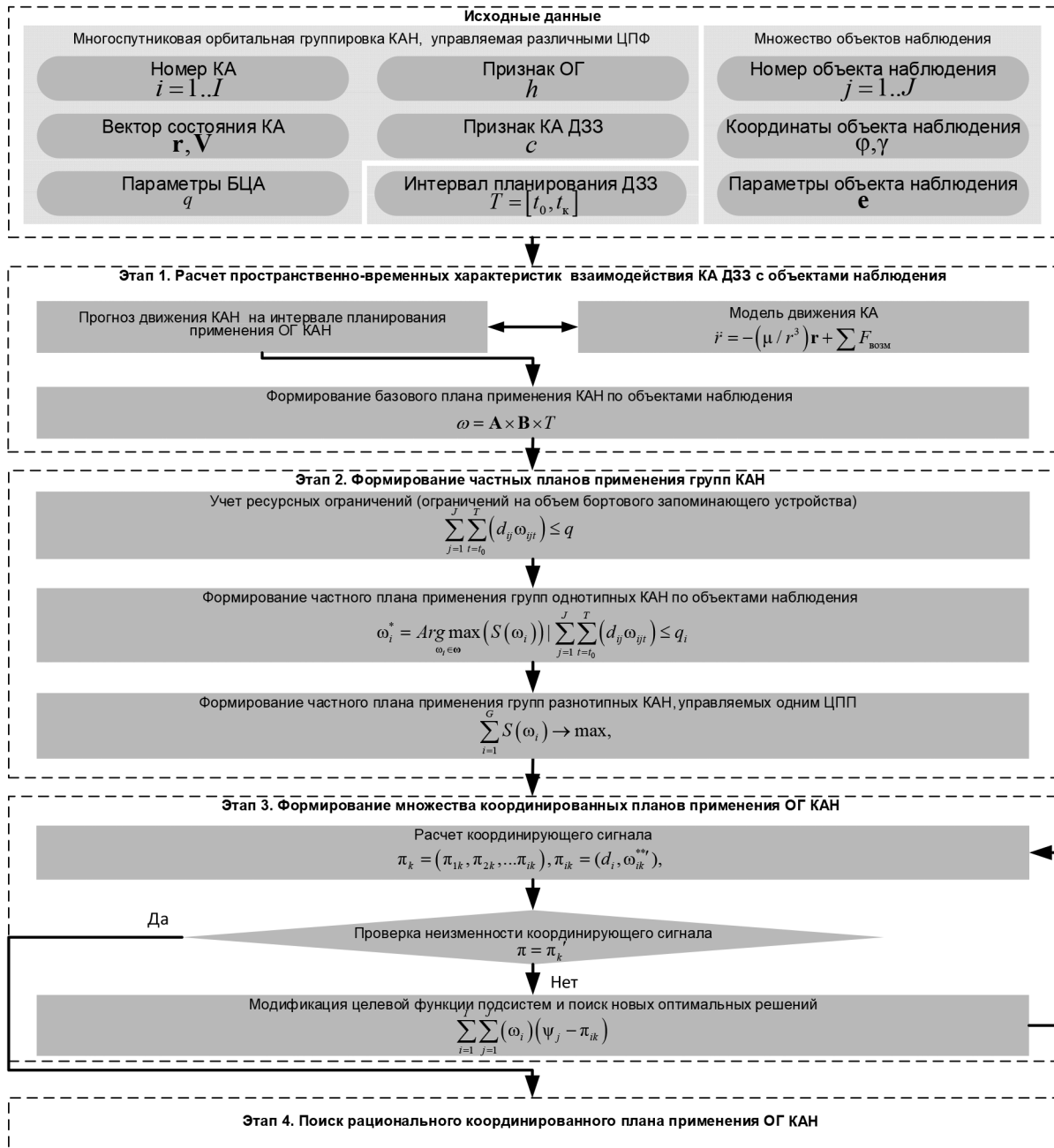


Рис. 3. Структурно-логическая схема метода

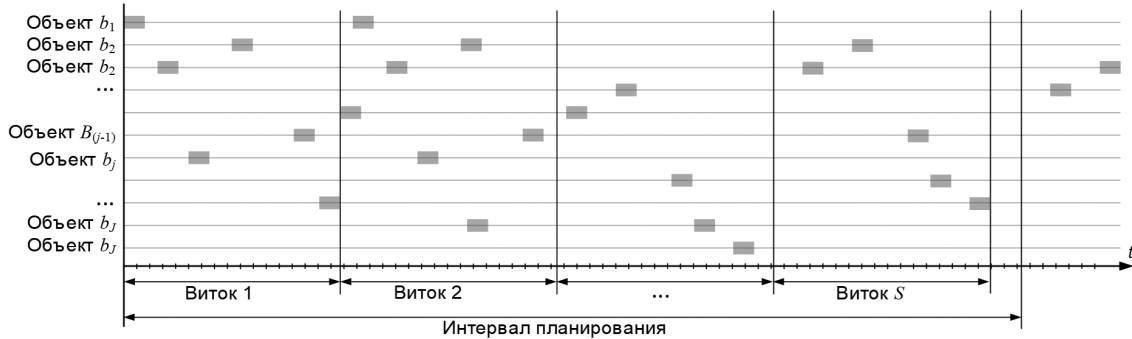


Рис. 4. Исходный план функционирования КАН

на его ресурс, которые можно представить в общем виде

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=t_0}^T (d_{ij} \omega_{ijt}) \leq q_i,$$

где  $d_{ij}$  — емкость, затрачиваемая на съемку  $j$ -го объекта наблюдения  $i$ -м КАН.

Задача планирования функционирования каждого из КАН может быть представлена как задача дискретного математического программирования

$$\begin{cases} \omega_i^* = \text{Arg max}_{\omega_i \in \Omega} (S(\omega_i)), \\ \sum_{j=1}^J \sum_{t=t_0}^T (d_{ij} \omega_{ijt}) \leq q_i, \end{cases} \quad (1)$$

методы решения которой рассмотрены в [15, 16].

Исходя из (1), задача планирования функционирования группы однотипных КАН может быть представлена в виде

$$\sum_{i=1}^G S(\omega_i) \rightarrow \max,$$

где  $G$  — количество КАН входящих в состав ОГ.

На третьем этапе метода осуществляется построение множества реализуемых координированных планов функционирования объединенной ОГ КА, составленной из групп КА разного типа. Задачей этапа является построение плана функционирования объединенной ОГ КАН, обеспечивающего наблюдение наибольшего числа значимых объектов с требуемым качеством.

В общем виде поиск координированного плана совместного функционирования объединенной ОГ КАН, составленной из групп КАН, можно представить, как итерационный процесс, суть которого состоит в том, что на каждой итерации происходит решение частных задач функционирования групп КАН. Результаты решения — планы функционирования  $\omega_{ik}^{*'}, i=1..I, k=1..K$  и соответствующие им значения вероятности распознавания состояния объекта  $P_{КАНij}^{*'}(\omega_{ik}^{*'})$  сообщаются Координатору. Здесь  $\omega_{ik}^{*'}$  — оптимальное решение, полученной в  $i$ -ой подсистеме на  $k$ -ой итерации. На ос-

нове полученных значений Координатор ставит и решает свою задачу

$$\begin{cases} \omega_{ik}^{**'} = \text{Arg max}_{\omega_i \in \Omega} (S(\omega_{ik}^{*'})), \\ \sum_{j=1}^J \sum_{t=t_0}^T (d_{ij} \omega_{ijt}^{*'}) \leq q_i, \\ P_{ОКСj}(\omega_{ik}^{*'}) \geq P_{\min j}, j=1..J, \end{cases} \quad (2)$$

производит расчет координирующего сигнала

$$\begin{aligned} \pi_k &= (\pi_{1k}, \pi_{2k}, \dots, \pi_{ik}), \\ \pi_{ik} &= (d_i, \omega_{ik}^{*'}), \end{aligned}$$

и передает его в подсистемы. Здесь  $\mathbf{d}_i$  — вектор-столбец ресурсных ограничений  $i$ -ой подсистемы. Задача (2) относится к задачам нелинейного программирования и решается методом условного градиента.

Подсистемы на основе полученного от Координатора координирующего сигнала производят модификацию целевой функции по правилу  $\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\omega_i)(\psi_j - \pi_{ik})$  и находят новые оптимальные решения  $\omega_{ik}^{*}'$ , которые сообщают Координатору. Признаком окончания итерационного процесса является неизменность координирующего сигнала  $\pi = \pi_k'$ , где  $\pi_k'$  — координирующий сигнал полученный на  $k$ -ой итерации. В результате определяются оптимальные решения подсистем  $\omega_{ik}^{**'}$  и оптимальный координирующий сигнал  $\pi'$ .

Найденное множество решений подсистем  $\omega_{ik}^{**'}$  содержит искомым рациональный координированный план функционирования объединенной ОГ КАН, поиск которого осуществляется на четвертом этапе.

### Результаты моделирования

Для оценивания эффективности использования предложенного в статье метода разработано программное средство [17], позволяющее автоматизировать процесс поиска плана функционирования объединенной ОГ КАН.

На основе разработанного программного средства проведен ряд экспериментов для различных вариантов исходных данных, в качестве которых рассматривались:



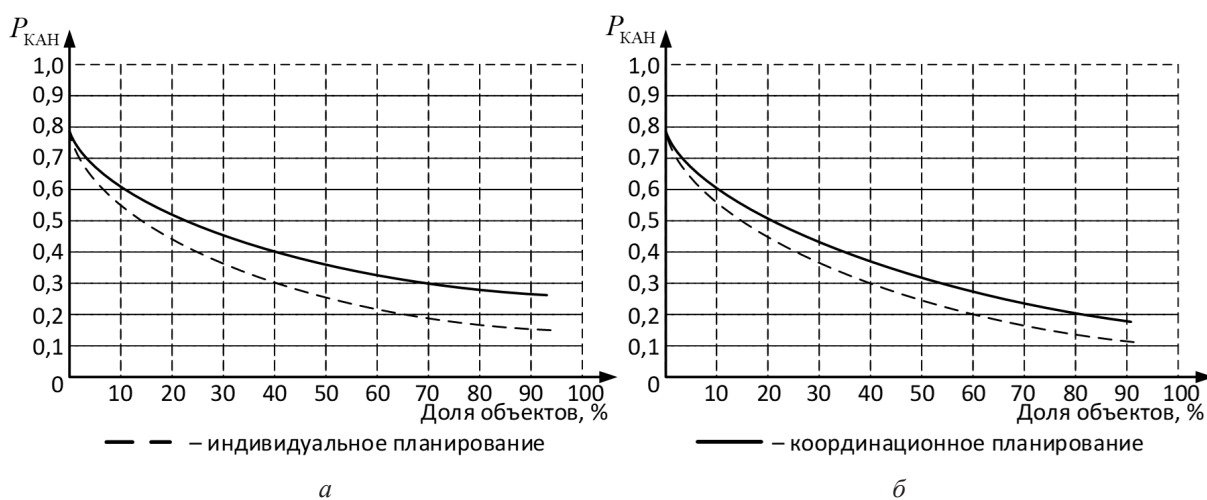


Рис. 5. Вероятность решения задачи распознавания состояния объекта наблюдения:  
а — для 1 группы объектов (46 ед.); б — для 2 группы объектов (92 ед.)

1) объединенная ОГ КАН общим количеством 15 КА, составленная из групп в 5, 3, и 2 ОЭ КА и 3, 1, и 1 РЛ КА;

2) два варианта планирования функционирования многоспутниковой ОГ КАН. Первый, предусматривающий индивидуальное планирование функционирования каждой группы КА и второй — в соответствии с предлагаемым методом;

3) две группы точечных объектов в количестве 46 и 92 единиц, расположенных равномерно на участке земной поверхности, ограниченном параллелями  $30^\circ$  с.ш.– $60^\circ$  с.ш. и меридианами  $30^\circ$  в.д.– $120^\circ$  в.д.;

4) интервал планирования функционирования равный 24 часам.

По результатам проведенных экспериментов были получены планы функционирования объединенных ОГ КАН для различных по составу исходных данных, а также соответствующие им оценки вероятности решения задачи наблюдения заданных групп точечных объектов (рис. 5).

Сравнительный анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

- с ростом размерности объединенной ОГ значения вероятности решения задачи наблюдения для планов, получаемых с использованием предлагаемого метода в среднем на 18–25 % выше чем для планов, полученных в результате индивидуального планирования каждой группы КА;

- с увеличением количества малых групп КА, в составе объединенной ОГ, значения вероятности решения задачи наблюдения, при коорди-

национном планировании увеличиваются в среднем на 5–13 % для каждой новой группы КА;

- планирование в соответствии с предлагаемым методом позволяет повысить вероятность решения задачи наблюдения по каждому из рассматриваемых объектов в среднем на 13–17 % за счет интеграции информации, получаемой от КАН другого типа.

Таким образом, предлагаемый метод позволяет повысить вероятность решения задачи распознавания состояния объектов наблюдения объединенной ОГ, составленной из групп КА разного типа, за счет применения координационных процедур при решении задачи планирования их функционирования.

### Заключение

Разработанный метод является развитием научно-методического аппарата планирования применения сложных организационно-технических систем и может быть использован для планирования и оценивания эффективности функционирования космических комплексов различного целевого назначения.

Следует отметить, что, несмотря на вычислительную сложность, предлагаемый метод имеет ряд существенных преимуществ, основными из которых являются:

- возможность построения безконфликтного координированного плана функционирования ОГ КАН, составленной из групп КА ОЭ и РЛ наблюдения, управление которыми осуществляет-

ся из различных ЦУП, структуру которой в общем виде можно представить как многоуровневую иерархическую систему;

– возможность учета требований заказчиков целевого функционирования к качеству информации, получаемой от Координатора.

### Литература

1. Соловьев В.А., Коваленко А.А., Соловьев С.В. Приоритетные научно-технические задачи в сфере освоения и эффективного использования космического пространства // Вестник российской академии наук. 2019. Том 89 (5). С. 496–501.

2. Лавров В.Н. Аналитический обзор космических программ ДЗЗ России и зарубежных стран // ИнноТер [Электронный ресурс]. 2016. URL: <https://innoter.com/scientific-articles/1092> (дата доступа 01.03.2021).

3. Тохиян О.О., Курлыков А.М., Райченко Б.В. Основные тенденции развития российских наземных средств целевого применения космических аппаратов ДЗЗ из космоса // Дистанционное зондирование земли из космоса в России. 2020. № 1. С. 48–53.

4. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2010. 148 с.

5. Березняков А.М., Горбулин В.И., Каргу Д.Л., Фадеев А.С., Щербачев В.И. Методика оптимального планирования применения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в обзорном режиме // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 1 (39). С. 39–45.

6. Заплетин М.П., Жакыпов А.Т. Планирование миссии космического аппарата дистанционного зондирования Земли на основе открытых данных // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 6. С. 1–9.

7. Торсунова О.Ф. Использование данных космической съемки сверхвысокого разрешения для решения задач территориального зонирования // Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23. № 2. С. 219–230.

8. Коваленко А.Ю. Математические аспекты оценивания результативности применения космических аппаратов дистанционного зондирования

Земли // Труды СПИИРАН. 2017. № 53 (4). С. 29–50.

9. Скобелев П.О., Скимунт В.К., Симонова Е.В., Жилиев А.А., Травин В.С. Планирование целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с использованием мультиагентных технологий // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 10 (171). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/planirovanie-tselevogo-primeneniya-gruppirovki-kosmicheskikh-apparatov-distsionnogo-zondirovaniya-zemli-s-ispolzovaniem> (дата обращения: 24.03.2021).

10. Галузин В.А., Симонова Е.В. Планирование съемки площадных объектов наблюдения группировкой космических аппаратов // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. № 6–2. С. 344–350.

11. Сологуб А.В., Скобелев П.О., Симонова Е.В., Царев А.В., Степанов М.Е., Жилиев А.А. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1. С. 16–26.

12. Павлов А.Н., Мануйлов Ю.С., Павлов Д.А., Слинько А.А. Планирование работы системы информационного взаимодействия кластера перспективных малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с учетом оценки ее робастности // Труды XVI Всероссийской конференции DICR-2017. — Новосибирск. 2017. С. 370–379.

13. Сквасников М.А., Григорьев А.Н., Коршунов Д.С., Октябрьский В.В., Алтухов А.И. Основы дистанционного зондирования земли: учеб. пособие. — СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2016. 184 с.

14. Куренков В.И., Салмин В.В., Абрамов Б.А. Моделирование целевого функционирования космических аппаратов наблюдения с учетом энергодобавки: учеб. пособие. — Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2007. 160 с.

15. Жолобов Д.А. Введение в математическое программирование: учебное пособие. М.: МИФИ, 2008. 376 с.

16. Загребяев А.М., Крицына Н.А., Кулябичев Ю.П., Шумилов Ю.Ю. Методы математического программирования в задачах оптимизации



сложных технических систем: учебное пособие. — М.: МИФИ. 2007. 332 с.

17. Глуздов А.Н., Динжос Р.И., Котяшов Е.В., Куваев О.Л., Малюгин А.В. // Программа координирования частных планов применения разнотипных организационно-технических систем с иерархической структурой. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021614154 (RU). 2021.

### References

1. Solov'ev V.A., Kovalenko A.A., Solov'ev S.V. Priority scientific and technical problems in the field of exploration and efficient use of outer space. Herald of the Russian Academy of Sciences. Volume 89 (5). P. 496–501.

2. Lavrov V.N. Analytical review of remote sensing space programs of Russia and foreign countries. InnoTer. 2016. Available at: <https://innoter.com/scientific-articles/1092> (accessed 01 March 2021).

3. Tokhiyan O.O., Kurlykov A.M., Raichenko B.V. Main trends in the development of Russian ground-based means of targeted use of ERS spacecraft from space // Remote sensing of the earth from space in Russia. № 1. P. 48–53.

4. Tokareva O.S. Processing and interpretation of the Earth Remote Sensing Data: textbook / Tokareva. O.S. — Tomsk: Publishing house of the Tomsk Polytechnic University. 2010. 148 p.

5. Bereznyakov A.M., Gorbunov V.I., Kargu D.L., Fadeev A.S., Shcherbakov V.I. Methods of optimal planning of using earth remote sensing space modules in the survey mode / VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2013. Vol. 12. P. 39–45.

6. Zapletin M.P., Zhakypov A.T. Planning a mission of an Earth remote sensing spacecraft based on open source data. Engineering journal: Science and Innovations. 2019. Vol. 6. P. 1–9.

7. Torsunova O.F. Use of aerial superresolution survey data for solving the tasks of terrestrial zoning. Siberian State University Geosystems and Technologies. 2018. Vol. 23. № 2. P. 219–230.

8. Kovalenko A.Y. Mathematical aspects of evaluating effectiveness of the earth's surface spacecraft. Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings. 2017. Issue № 4 (53). P. 29–50.

9. Skobelev P.O., Skirmunt V.K., Simonova E.V., Zhilyaev A.A., Travin V.S. Planning for target application of a group of Earth remote sensing satellites using multi-agent technologies. Izvestia SFedU. Engineering Sciences. 2015. Vol. 10 (171). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/planirovanie-tselevogo-primeneniya-gruppirovki-kosmicheskikh-apparatov-distantsionnogo-zondirovaniya-zemli-s-ispolzovaniem> (accessed 24 Mart 2021).

10. Galuzin V.A., Simonova E.V. Planning the surveying of area observation objects by a group of spacecraft. Academic Journal «Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences». 2018. Vol. 6 (2). P. 344–350.

11. Sologub A.V., Skobelev P.O., Simonova E.V., Tsarev A.V., Stepanov M.E., Zhilyaev A.A. Intelligent system for distributed problem solving in cluster of small satellites for Earth remote sensing. Information and Control Systems. 2013. № 1. P. 16–26.

12. Pavlov A.N., Manuilov Yu.S., Pavlov D.A., Slinko A.A. Planning of the system of information interaction cluster of promising small satellites of Earth remote sensing with the account of evaluation of its robustness. Proceedings of XVI All-Russian Conference DICR-2017. 2017. P. 370–379.

13. Skvaznikov M.A., Grigoriev A.N., Korshunov D.S., Oktyabrsky V.V., Altukhov A.I. Fundamentals of Earth Remote Sensing. — SPb.: Military Space Academy of A.F. Mozhaisky. 2016. 184 p.

14. Kurenkov V.I., Salmin V.V., Abramov B.A. Modeling the Target Functioning of Space Observation Vehicles Taking into Account the Energy Balance. — Samara. 2007. 160 p.

15. Zholobov D.A. Introduction to Math Programming. — Moscow: MEPhI Publ. 2008. 376 p.

16. Zagrebaev A.M., Kritsyna N.A., Kulyabichev Yu.P., Shumilov Yu.Yu. Methods of mathematical programming in the optimization problems of complex technical systems. — Moscow: MIFI Publ. 2007. 332 p.

17. Gluzdov A.N., Dinzhos R.I., Kotyashov E.V., Kuvaev O.L., Malyugin A.V. Program for coordinating private plans for the use of different types of organizational and technical systems with a hierarchical structure. The Certificate on Official Registration of the Computer Program. № 2021614154 RU. 2021.