

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,  
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.  
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 621.314.5 DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.9.3.3.12

**Алгоритм формирования рабочих структур  
при управлении многоспутниковой  
орбитальной группировкой**

**А. Ю. Потюпкин**, *д. т. н., проф., potyupkin\_in@spacecorp.ru*  
*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*  
**Ю. А. Тимофеев**, *к. т. н., с. н. с., timofeev\_in@spacecorp.ru*  
*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*  
**С. А. Волков**, *к. т. н., с. н. с., volkov\_in@spacecorp.ru*  
*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**Аннотация.** Рассматривается алгоритм формирования рабочих орбитальных структур космических аппаратов для реализации целевых эффектов многоспутниковой орбитальной группировки. Алгоритм основан на решении задачи многокритериального выбора локальных орбитальных структур на избыточном множестве космических аппаратов с использованием нечеткой меры в виде функций принадлежности. Приведена формализация алгоритма в терминах теории нечетких множеств. Рассмотрен пример реализации алгоритма для многоспутниковой системы дистанционного зондирования Земли. Алгоритм формирования рабочих структур может являться составной частью комплекса задач командно-программного обеспечения, реализуемых в Центре управления полетом перспективными многоспутниковыми орбитальными группировками.

**Ключевые слова:** алгоритм, многоспутниковая орбитальная группировка, управление, функции принадлежности

**The Algorithm for Formation of Working Structures  
in Multi-Satellite Orbital Constellation Management**

**A. Yu. Potyupkin**, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., potyupkin\_in@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*  
**Yu. A. Timofeev**, *Cand. Sci. (Engineering), senior researcher, timofeev\_in@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*  
**S. A. Volkov**, *Cand. Sci. (Engineering), senior researcher, volkov\_in@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** This article presents an algorithm for the formation of working orbital spacecraft structures for the implementation of the target effects of a multi-satellite orbital constellation. The algorithm is based on solving the problem of multi-criteria selection of local orbital structures on an excessive set of space vehicles using a fuzzy measure in the form of membership functions. The algorithm is formalized in terms of fuzzy set theory. An example of the implementation of the algorithm for a multi-satellite system of remote sensing of the Earth is considered. The algorithm for the formation of working structures can be an integral part of the complex of command and software tasks implemented in the Mission Control Center by promising multi-satellite orbital constellations.

**Keywords:** algorithm, multi-satellite orbital constellation, management, control, membership functions

## Введение

Вопросы создания и эксплуатации многоспутниковых орбитальных группировок (МОГ) в настоящее время приобретают все большую актуальность. В связи с развитием технологий создания малоразмерных КА многоспутниковые группировки становятся объектом интереса уже не только государственных, но и частных структур. В силу чего специалисты активно обсуждают различные аспекты проблематики МОГ как дистанционно управляемых многоагентных систем. В работах [1–3] подробно рассмотрены вопросы создания и управления МОГ, а в статье [3] рассмотрен вариант решения задачи управления МОГ на основе концепции режимов функционирования в условиях ограниченности ресурсов управления.

В целом задача управления МОГ рассматривается на системном уровне как задача управления системным эффектом (дифференциальным выходным эффектом в терминах ГОСТ Р56526-2015), который, в свою очередь, предполагает управление целевыми эффектами (ЦЭ) системы, орбитальной структурой, состоянием МОГ и системой информационного обмена. Подробно указанные вопросы рассмотрены в работах [1, 3]. Напомним общую концепцию управления.

«Задача управления МОГ рассматривается как задача множественного выбора локальных орбитальных структур (ОС) на избыточном множестве КА для реализации заданных потребителем ЦЭ исходя из ресурсных ограничений. Учитывая множество ограничений, связанных с баллистическим построением МОГ, ресурсом отдельных КА, поставленная задача может быть решена одним из методов решения многокритериальных задач, например методом главного критерия или последовательных уступок.

Общая структура процесса принятия решения на управление предполагает получение задачи от потребителя, выбор ЦЭ, выбор орбитальной структуры для его реализации, поиск КА, способных в требуемое время ее реализовать, оценку их технической готовности, запаса ресурсов — энергетических и рабочего тела (ЭЭ и РТ), наличие возможностей информационного обмена. Предварительным решением является начальная активация

по типу ЦЭ (назначение КА, способных реализовать ЦЭ) и конечным — итоговая активация выбранных КА.

После начальной активации, т. е. потенциальной оценки возможности выполнения задачи некоторой группой КА, следует этап устранения конфликтов. Дело в том, что приведенные выше задачи могут решаться одновременно для множества потребителей и одни и те же КА могут оказываться в различных локальных ОС как способные реализовать выбранные ЦЭ. В связи с этим важным шагом является выявление и устранение конфликтов и, в ряде случаев, переназначение КА. После устранения конфликтов происходит итоговая активация выбранных КА. Указанные задачи могут быть решены как потребителем, например для КНС выбор необходимого созвездия навигационных КА осуществляется потребителем автоматически, так и в более сложном случае операторами Центра управления полетом космической системы, как для систем ДЗЗ.

Общее правило принятия решения выглядит следующим образом:

*Если КА находится в орбитальной позиции, соответствующей нужному целевому эффекту и его локальной орбитальной структуре, зарегистрирован в орбитальной соте, обладает требуемой технической готовностью и не находится в состоянии конфликта с другими КА, то он может быть активирован для реализации системного эффекта.*

При этом определение соответствия КА нужной орбитальной структуре при заданном ЦЭ в заданной области пространства может быть осуществлено путем наложения множества ОС ЦЭ на матрицу орбитальных параметров.

Следует учитывать, что формирование правил принятия решения на управление с учетом режимов функционирования представляет собой отдельную и весьма сложную исследовательскую задачу, так как выбор варианта режима для каждого из КА группировки и системы в целом остается прерогативой специалистов Центра управления полетом космической системы» [3]. В связи с этим возникает актуальная задача разработки алгоритма формирования рабочих структур при управлении МОГ.

## Решение задачи

Примем, что каждая ОС предназначена для реализации некоторого целевого эффекта. Если все ЦЭ будут реализованы с требуемым качеством, то и общий системный эффект (СЭ) как дифференциальный выходной эффект также будет реализован должным образом. В качестве примера подобного эффекта приведем обеспечение доступности потребителей к получению услуг космических систем, где под доступностью понимается способность системы обеспечивать потребителей сервисами требуемого качества в зоне действия системы. Например, для космической навигационной системы (КНС) доступность характеризуется возможностью получения потребителем в рабочей зоне системы достоверной информации о своем местоположении в определенный период времени и с требуемой точностью. В качестве показателя доступности навигационного поля КНС в целом используется вероятность обеспечения доступности, рассчитываемая как процент времени, в течение которого пространственный геометрический фактор PDOP меньше 6 на любом 24-часовом интервале в зоне действия системы.

Для систем связи доступность рассматривается как способность систем связи обеспечивать абонентам систем связи доступ к радиоресурсу при сохранении назначенных приоритетов и способов установления связи. Оценивается она вероятностью санкционированного доступа абонента независимо от его местоположения к радиоресурсу системы связи. Например, для космических систем связи

$$P_D = \frac{S_n T_a}{S_a T_0},$$

где  $S_n$  — площадь пересечения района расположения абонента и площадью зоны обзора радиоаппаратуры;  $S_a$  — площадь района расположения абонента;  $T_a$  — время, в течение которого абонент находится в зоне радиоприема во время цикла обращения КА;  $T_0$  — период обращения КА.

Решение задачи множественного выбора или одновременного выбора на множестве возможных структур, порождаемых отображением множества задач на множество исполнителей — агентов, предполагает выбор наилучшего или приемлемого вари-

анта в соответствии с выбранным критерием предпочтения.

Следует учитывать, что в настоящее время существует большое разнообразие методов многокритериального принятия решений как в условиях определенности, так и в условиях различных видов неопределенности: стохастической и нестохастической. Рассматриваемая задача относится к классу задач, решаемых в условиях неопределенности, и, в связи с отсутствием достаточной статистики, неопределенности нестохастической. Математическим аппаратом, позволяющим решать задачи выбора в таких условиях, является теория нечетких множеств [4, 5]. Понятие нечеткого множества основывается на предположении о том, что любой элемент лишь в некоторой степени принадлежит данному множеству. Степень принадлежности определяется нечеткой мерой — функцией принадлежности (ФП) —  $\mu(\bullet) \in [0, 1]$ . При этом  $\mu(\bullet) = 1$  — элемент принадлежит множеству,  $\mu(\bullet) = 0$  — не принадлежит,  $0 < \mu(\bullet) < 1$  — принадлежит в некоторой степени. Функции принадлежности могут являться результатом экспертной оценки как степени уверенности лица, принимающего решение (ЛПР) или обработки количественных данных. Подход, основанный на теории нечетких множеств, позволяет математически оперировать не только с неявно заданными данными, но и со смысловым содержанием слов человека. Например, высказывание «Уровень реализации системного эффекта Высокий» может быть описано ФП следующего вида (рис. 1).

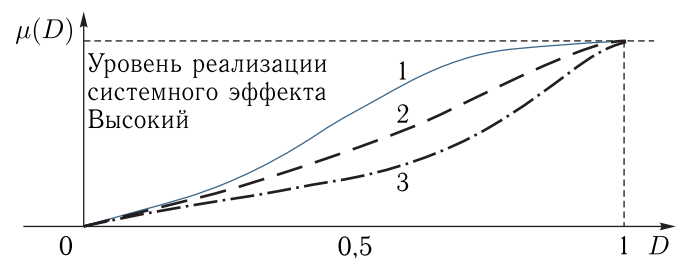


Рис. 1. Функция принадлежности высказывания «Уровень реализации системного эффекта Высокий»

Здесь  $\mu(D)$  — ФП,  $D$  — доступность космической системы. При этом рассматриваются 3 варианта ФП, отражающих различные варианты предпочтений ЛПР.

Рассмотрим порядок выбора ЦЭ с использованием нечеткой меры как меры сравнения различных вариантов. Будем опираться на заявленное правило выбора и декомпозируем его на условия и выводы из них.

*Если КА находится в орбитальной позиции, соответствующей нужному целевому эффекту и его локальной орбитальной структуре, — Условие 1, зарегистрирован в орбитальной соте — Условие 2,*

*обладает требуемой технической готовностью — Условие 3*

*и не находится в состоянии конфликта с другими КА — Условие 4, то он может быть активирован для реализации системного эффекта — Вывод из условий.*

При этом Условие 2 — КА зарегистрирован в орбитальной соте — в общем случае может рассматриваться как условие решения задач информационного обмена между различными КА и между КА и наземными комплексами управления и специальным комплексом.

Введем функции принадлежности для приведенных выше условий и вывода. Пусть  $\mu_{\text{Ос/ЦЭ}}(\bullet)$  — ФП Условия 1 — КА находится в орбитальной структуре, соответствующей заданному ЦЭ;

$\mu_{\text{ИО}}(\bullet)$  — ФП Условия 2 — решены задачи информационного обмена «Б-Б», «Б-З»;

$\mu_{\text{ТГ}}(\bullet)$  — ФП Условия 3 — КА обладает требуемой технической готовностью;

$\mu_{\text{Кфл.}}(\bullet)$  — ФП Условия 4 — КА не находится в состоянии конфликта с другими КА;

$\mu_{\text{А}}(\bullet)$  — ФП Вывода — КА может быть активирован для реализации системного эффекта.

Тогда степень истинности принятия решения об активации КА из множества возможных на основании Условий 1–4, учитывая, что логическая операция «И» в теории нечетких множеств рассматривается как операция  $\min$ , можно оценить следующим образом:

$$\mu_{\text{А}}(\bullet) = \min\{\mu_{\text{Ос/ЦЭ}}(\bullet), \mu_{\text{ИО}}(\bullet), \mu_{\text{ТГ}}(\bullet), \mu_{\text{Кфл.}}(\bullet)\}.$$

В свою очередь, правило выбора конкретного  $j$ -го КА из множества  $N$  возможных как определение наиболее предпочтительного варианта по максимальному значению выбранной меры срав-

нения — ФП выглядит как

$$\mu_{\text{А}}^*(\bullet) = \max \min\{\mu_{\text{Ос/ЦЭ}}(\bullet), \mu_{\text{ИО}}(\bullet), \mu_{\text{ТГ}}(\bullet), \mu_{\text{Кфл.}}(\bullet)\}.$$

Рассмотрим варианты задания рассмотренных функций принадлежности. В литературе можно найти следующие виды ФП: треугольная, трапециевидная, гауссова, экспоненциальная, сигмоидальная, обобщенная колоколообразная и ряд других функций. Выбор конкретного варианта и его параметров определяется характером решаемой задачи и носит в определенной мере субъективный характер. Однако после задания ФП дальнейшие вычисления и выводы являются строго математически обоснованными.

Примем в качестве рабочего варианта функцию принадлежности экспоненциального вида. В этом случае

$$\mu(k) = e^{-\alpha k} \quad \text{или} \quad \mu(k) = 1 - e^{-\alpha k},$$

где  $k$  — информативный параметр, отражающий семантику решаемой задачи;  $\alpha$  — параметр формы ФП, определяемый, например, как  $\alpha_{\gamma} = -\ln \gamma/k_{\gamma}$ , где  $\gamma$  — значение ФП для заданного  $k$ . Например, если выбрано  $k'$ , для которого  $\gamma = \mu(k') = 0,5$ , то  $\alpha_{0,5} = -\ln 0,5/k_{0,5}$ .

С увеличением полезного эффекта степень истинности условия должна возрастать, но при этом не должна превышать 1.

Тогда ФП Условия 1 — выбора орбитальной структуры для реализации заданного ЦЭ в простейшем случае выглядит как  $\mu_{\text{Ос/ЦЭ}}(\bullet) = \mu_{\text{Ос/ЦЭ}}(\rho)$ , где  $\rho$  — расстояние от оптимального для заданного ЦЭ расположения КА. Однако для реализации ЦЭ с многоспутниковой группировке одновременно используются несколько КА. Следовательно, возникает множество расстояний  $\rho$  и характер принятия решения становится не столь однозначным. В связи с этим целесообразно в качестве информационного параметра в данном случае использовать степень реализации ЦЭ при данной орбитальной структуре, например наилучший геометрический фактор для КНС, кратность перекрытия зон радиовидимости для спутниковых систем связи, для систем ДЗЗ в случае непрерывности наблюдения заданного района — интервал времени



ненаблюдаемости района, в случае реализации ЦЭ стереосъемки основной характеристикой геометрического качества стереопары считается отношение базиса фотографирования к высоте полета (В/Н), который также называют показателем стереосъемки (должен быть приблизительно 1/50). Следовательно,  $\mu_{Ос/ЦЭ}(\bullet) = \mu_{Ос/ЦЭ}(k_{ЦЭ})$ .

В общем случае при использовании матрицы орбитальных параметров задаются фильтры, выделяющие на множестве КА подмножество, на котором могут быть выбраны КА, обеспечивающие на момент решения целевой задачи наилучшее значение выходного показателя целевого эффекта. Так, в табл. 1 разными цветами выделены две группы КА (1,3) и (2,4), которые на данный момент времени  $t_1$  создают орбитальную структуру для реализации заданного ЦЭ, но с разным значением выходного показателя.

Таблица 1. Матрица орбитальных параметров

КА	Время	X	Y	Z	$V_x$	$V_y$	$V_z$
1	$t_1$	$X^1(t_1)$	$Y^1(t_1)$	$Z^1(t_1)$	$V_x^1(t_1)$	$V_y^1(t_1)$	$V_z^1(t_1)$
2	$t_1$	$X^2(t_1)$	$Y^2(t_1)$	$Z^2(t_1)$	$V_x^2(t_1)$	$V_y^2(t_1)$	$V_z^2(t_1)$
3	$t_1$	$X^3(t_1)$	$Y^3(t_1)$	$Z^3(t_1)$	$V_x^3(t_1)$	$V_y^3(t_1)$	$V_z^3(t_1)$
4	$t_1$	$X^4(t_1)$	$Y^4(t_1)$	$Z^4(t_1)$	$V_x^4(t_1)$	$V_y^4(t_1)$	$V_z^4(t_1)$
.....	$t_1$	.....	.....	.....	.....	.....	.....
N	$t_1$	$X^N(t_1)$	$Y^N(t_1)$	$Z^N(t_1)$	$V_x^N(t_1)$	$V_y^N(t_1)$	$V_z^N(t_1)$

Следовательно, в результате формируется множество возможных ОС с ФП  $\mu_{Ос/ЦЭ}^i(k_{ЦЭ})$ , где  $i = 1, m$ , а правило выбора будет выглядеть как

$$\mu_{Ос/ЦЭ}^*(k_{ЦЭ}) = \max \mu_{Ос/ЦЭ}^i(k_{ЦЭ}).$$

Следующей ФП является  $\mu_{ИО}(\bullet)$  — решения задачи информационного обмена. Следует учитывать, что в области мультисервисных сетей связи существует множество показателей, характеризующих качество предоставляемой услуги связи QoS для данной скорости передачи и типа данных [6–8] (см. табл. 2). Здесь качество обслуживания (Quality of Service, QoS) — «это совокупность показателей, которые определяют степень удовлетворения

пользователя предоставляемым ему обслуживанием. Качество обслуживания определяется в точке доступа к услуге и характеризуется свойствами удобства использования, обеспеченности, действенности (доступности, непрерывности, целостности) и безопасности обслуживания» [9].

Как видно из таблицы, однозначно выделить информативный параметр  $k$  для задания ФП затруднительно. В связи с этим предлагается следующий вариант его определения, основанный на выделении приоритетного показателя качества на основании определения типа данных и вида услуги. Например, для космических систем ДЗЗ для типа данных — «данные» и вида услуги — «передача изображений» с учетом требований по оперативности передачи информации в ограниченных зонах радиовидимости приоритетным является показатель «скорость передачи данных». В этом случае параметр  $k$  — скорость передачи данных  $V$  и  $\mu_{ИО}(\bullet) = \mu_{ИО}(V)$ , а коэффициент  $\alpha$  определяется с учетом остальных параметров качества обслуживания.

Важным условием принятия решения является *Условие 3* — КА обладает требуемой технической готовностью с ФП  $\mu_{ТГ}(\bullet)$ . Как правило, техническую готовность КА характеризуют коэффициентом готовности  $K_r = T_p / (T_p + T_o)$ , где  $T_p$ ,  $T_o$  — время нахождения КА в состоянии работоспособности и отказа. Однако возможность использования КА по назначению определяется не только технической готовностью, но и выделенными запасами рабочего тела (РТ) и электроэнергии (ЭЭ), необходимых для решения задачи. Поэтому будем рассматривать *Условие 3* как комплексное, включающее следующие частные условия: КА работоспособен — *условие 3.1*. И обладает необходимым выделенным запасом РТ — *условие 3.2*. И обладает требуемым выделенным запасом ЭЭ — *условие 3.3* с соответствующими функциями принадлежности  $\mu_{3.1}(K_r)$ ,  $\mu_{3.2}(РТ)$ ,  $\mu_{3.3}(ЭЭ)$ . Тогда ФП  $\mu_{ТГ}(\bullet)$  будет композицией ФП частных условий следующего вида:

$$\mu_{ТГ}^*(\bullet) = \min\{\mu_{3.1}(K_r), \mu_{3.2}(РТ), \mu_{3.3}(ЭЭ)\}.$$

Заключительным этапом является определение ФП  $\mu_{Кфл.}(\bullet)$  — ФП *Условия 4* — КА не находится в состоянии конфликта с другими КА. Конфликт в данном случае будем рассматривать

Таблица 2. Требования к качеству услуг, предоставляемых мультисервисными сетями связи [8]

Тип данных	Название услуги	Требуемая скорость передачи	Параметры качества услуги		
			Задержка, мс	Джиттер	Потери, %
Аудио	Телефония	4–64 кбит/с	< 150 мс (отличное QoS), < 400 мс (допустимое QoS)	< 1 мс	< 3 %
	Передача голоса	4–32 кбит/с	< 1 с (для воспроизведения), < 2 с (для записи)	< 1 мс	< 3 %
	Звуковое вещание	16–128 кбит/с	< 10 с	≪ 1 мс	< 1 %
Видео	Видеоконференция	> 384 кбит/с	< 150 мс (отличное QoS), < 400 мс (допустимое QoS)		< 1 %
Данные	Просмотр WEB-страниц	10 кБ	< 2 с/стр. (отличное QoS), < 4 с/стр. (допустимое QoS)	–	0
	Передача файлов	10 кБ–10 МБ	< 15 с (отличное QoS), < 60 с (допустимое QoS)	–	0
	Передача изображений	> 100 кБ	< 15 с (отличное QoS), < 60 с (допустимое QoS)	–	0
	Доступ к электронной почте	< 10 кБ	< 2 с (отличное QoS), < 4 с (допустимое QoS)	–	0
	Факс	> 10 кБ	< 30 с/стр.	–	< 10 <sup>-6</sup> BER

как событие, заключающееся в том, что данный КА на рассматриваемый момент времени является кандидатом на включение в другие орбитальные структуры для реализации других ЦЭ. Будем считать, что чем выше уровень востребованности КА, тем уровень конфликтности выше. Тогда  $\mu_{\text{Кфл.}}^i(\bullet) = \mu_{\text{Кфл.}}^i(n)$ , где  $n$  — число заявок на задействование рассматриваемого КА.

Таким образом, определение каждой из рассмотренных ФП в конкретных ситуациях выбора позволит оценить степень обоснованности назначения тех или иных КА для реализации заданных ЦЭ с итоговой оценкой степени соответствия по правилу

$$\mu_A^{ij*}(\bullet) = \min\{\mu_{\text{Ос/ЦЭ}}^{i*}(k_{\text{ЦЭ}}), \mu_{\text{ИО}}^{i*}(V), \mu_{\text{ТГ}}^{i*}(K_r, \text{РТ}, \text{ЭЭ}), \mu_{\text{Кфл.}}^{i*}(n)\},$$

где «\*» — символ оценки значения ФП,  $i$  — номер орбитальной структуры.

Следует учитывать, что для каждой из указанных ФП должен быть задан пороговый уровень выполнения каждого из рассмотренных выше условий:

$$\mu^*(\bullet) \geq \mu_{\text{тр}}(\bullet).$$

Окончательное решение о назначении КА будет выглядеть как

$$\mu_A^{ij*}(\bullet) = \max \min\{\mu_{\text{Ос/ЦЭ}}^{i*}(k_{\text{ЦЭ}}), \mu_{\text{ИО}}^{i*}(V), \mu_{\text{ТГ}}^{i*}(K_r, \text{РТ}, \text{ЭЭ}), \mu_{\text{Кфл.}}^{i*}(n)\}.$$

Схема принятия решения как последовательной редукции размерности исходного множества КА в соответствии с требованиями критериев, выдвигаемых условиями 1–4, представлена на рис. 2.

Здесь исходное множество КА размерности  $N$  последовательно редуцируется в итоговое множество КА размерности  $M < N$  по следующей схеме:  $N \rightarrow n_1 \rightarrow n_2 \rightarrow n_3 \rightarrow n_4 \rightarrow M$ , где  $n_j$  — размерность множества КА после выполнения  $j$ -го условия.

Общий алгоритм принятия решения о назначении КА будет выглядеть следующим образом:

1. Задание ЦЭ с указанием вида ЦЭ, его пространственно-временных характеристик.
2. Определение параметров возможных ОС для реализации ЦЭ, задание множества фильтров для матрицы орбитальных параметров.

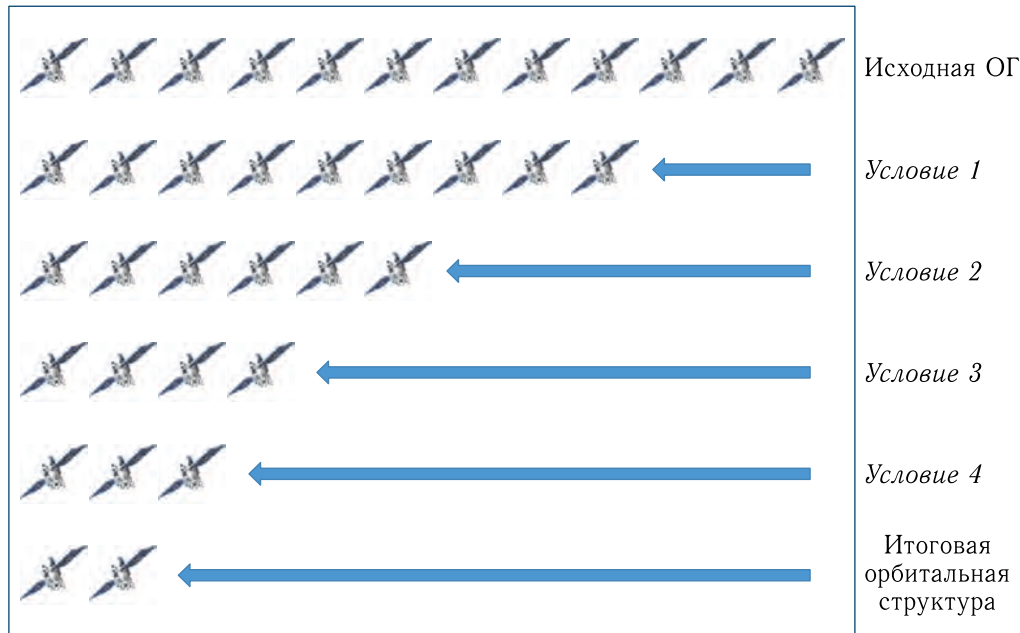


Рис. 2. Общая схема принятия решения

3. Сравнение возможных ОС, выделенных в результате фильтрации, по степени реализации ЦЭ путем вычисления отдельных ФП  $\mu_{Ос/ЦЭ}^i(k_{ЦЭ})$ , ранжирование ОС по значениям ФП.
4. Определение подмножества подходящих  $\mu_{Ос/ЦЭ}^*(k_{ЦЭ})$ , проверка выполнения требований порогового уровня. В случае невыполнения — прекращение решения задачи, отказ от реализации ЦЭ.
5. Проверка выполнения условия решения задач информационного обмена для выбранных на этапе 3 КА, определение  $\mu_{ИО}^*(V)$  и выполнения требований порогового уровня. В случае невыполнения требований для заданной ОС — возврат к п. 4, выбор следующей по рангу ОС.
6. Определение готовности выбранных КА к выполнению целевой задачи с учетом их работоспособности, запаса РТ и ЭЭ, определение  $\mu_{ТГ}^*(K_r, РТ, ЭЭ)$ , проверка выполнения требований порогового уровня. В случае невыполнения требований для заданной ОС — возврат к п. 4, выбор следующей по рангу ОС.
7. Проверка уровня конфликтности для выбранных на этапах 1–6 КА, определение  $\mu_{Кфл.}^*(n)$ , проверка выполнения требований порогового уровня. В случае невыполнения требований для заданной ОС — возврат к п. 4, выбор следующей по рангу ОС.
8. Итоговое назначение выбранных КА для реализации ЦЭ, вычисление итоговой  $\mu_A^*(\bullet)$ , сравнение с пороговым значением. В случае невыполнения — прекращение решения задачи, отказ от реализации ЦЭ.

Приведенный алгоритм является итерационным и предполагает последовательное принятие решений с учетом выполнения тех или иных условий.

Вместе с тем возможен и вариант параллельного рассмотрения всех возможных ОС, полученных на этапе 2 приведенного алгоритма, с последующей оценкой всех ФП для множества ОС и результирующего выбора.

Достоинства и недостатки каждого из рассмотренных вариантов выбора должны обсуждаться применительно к конкретным условиям с учетом требуемого системного эффекта, множества ЦЭ, состава орбитальной группировки, состояния КА и системы информационного обмена, вычислительными возможностями системы планирования.

Рассмотрим пример реализации предложенного алгоритма. Пусть рассматривается многоспутниковая орбитальная группировка ДЗЗ, относящихся

к классу миниКА (до 500 кг), энерговооруженностью до 2 Квт, способных как к маневрированию в плоскости орбиты, так и к изменению угловой ориентации путем осуществления программных разворотов с использованием активных элементов системы управления движением, включающей как реактивные двигательные установки, так и силовые гироскопы [10]. Требуемым целевым эффектом является ЦЭ стереосъемки [11] заданного участка поверхности Земли (рис. 3). На заданный момент времени этот эффект потенциально могут реализовать 5 КА, обладающих требуемыми пространственно-временными характеристиками (находящимися над заданным районом мониторинга).

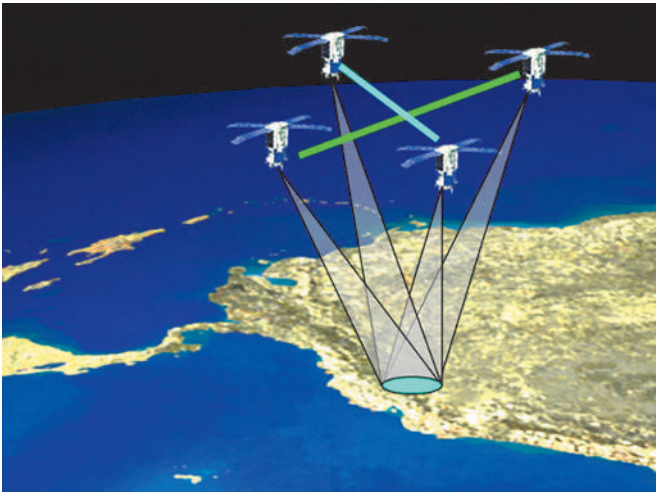


Рис. 3. Пример вариантов реализации ЦЭ стереосъемки

Рассмотрим способы задания ФП условий выбора КА для реализации ЦЭ. Будем рассматривать варианты использования ФП экспоненциального вида. Следует учитывать, что в практических приложениях выдвинутые Условия принятия решения 1–4 могут трансформироваться без утраты смыслового содержания.

Тогда *Условие 1* — КА находится в орбитальной структуре, соответствующей заданному ЦЭ, — преобразуется в *условие 1* показатель качества стереосъемки **ВЫСОКИЙ** — и ФП будет выглядеть с. о.:

$$\mu_{\text{Ос/ЦЭ}}(k_{\text{ЦЭ}}) = e^{-\alpha \Delta \left( \frac{B}{H} \right)},$$

где  $B$  — стереобаза между КА,  $H$  — высота полета,  $\Delta(B/H) = |B/H - (B/H)_{\text{зад.}}|$  — отклоне-

ние от заданного показателя стереосъемки, например  $B/H = 1/50$ ,  $\alpha = 69,31472$  для  $\Delta(B/H)_{0,5} = 0,01$  рад.

*Условие 2* — решены задачи информационного обмена «Б-Б», «Б-З» — представим как скорость передачи данных съемки **ДОСТАТОЧНАЯ** с ФП

$$\mu_{\text{ИО}}^{i*}(V) = 1 - e^{-\alpha(V)},$$

где  $V$  — скорость передачи данных в системе информационного обмена. С учетом данных, приведенных в табл. 2, для передачи изображений требуется  $V \geq 100$  КБ,  $\alpha = 0,017329$  для  $V_{0,5} = 40$  Кб.

Для комплексного *Условия 3* — КА обладает требуемой технической готовностью — ФП  $\mu_{\text{ТГ}}^{i*}(K_{\text{Г}}, \text{РТ}, \text{ЭЭ})$  вычисляется путем композиции ФП  $\mu_{3,1}(K_{\text{Г}})$ ,  $\mu_{3,2}(\text{РТ})$ ,  $\mu_{3,3}(\text{ЭЭ})$  для ряда частных условий: коэффициент готовности КА высокий — *условие 3.1*. И обладает необходимым выделенным запасом РТ — *условие 3.2*. И обладает требуемым выделенным запасом ЭЭ — *условие 3.3*.

Тогда  $\mu_{3,1i}^{i*}(K_{\text{Г}}) = 1 - e^{-\alpha(K_{\text{Г}})}$  при коэффициенте готовности  $K_{\text{Г}} \in [0, 1]$ ,  $\alpha = 4,620981$  для  $K_{\text{Г}0,5} = 0,15$ .

$$\mu_{3,2i}^{i*}(\nu_{\text{РТ}}) = 1 - e^{-\alpha(\nu_{\text{РТ}})}$$

при выделенном запасе РТ  $\nu_{\text{РТ}} \in [0, 100]$ , гр.

$\alpha = 0,034657359$  для  $\nu_{\text{РТ}0,5} = 20$  гр.

$$\mu_{3,3i}^{i*}(\epsilon_{\text{ЭЭ}}) = 1 - e^{-\alpha(\epsilon_{\text{ЭЭ}})}$$

при выделенном запасе ЭЭ  $\epsilon_{\text{ЭЭ}} \in [0, 500]$ , Вт,

$\alpha = 0,006931472$  для  $\epsilon_{\text{ЭЭ}0,5} = 100$  Вт. и  $\mu_{\text{ТГ}}^{i*}(\bullet) = \min\{\mu_{3,1i}^{i*}(K_{\text{Г}}), \mu_{3,2i}^{i*}(\text{РТ}), \mu_{3,3i}^{i*}(\text{ЭЭ})\}$ .

*Условие 4* — КА не находится в состоянии конфликта с другими КА — будем рассматривать как уровень конфликтности **НИЗКИЙ** с ФП

$$\mu_{\text{Кфл.}}^{i*}(n) = e^{-\alpha n},$$

где  $n \in [1, 5]$  — число заявок на задействование рассматриваемого КА,  $\alpha = 0,34657359$  для  $n_{0,5} = 2$ .

Общий вид некоторых из указанных ФП приведен на рис. 4 (а, б, в, г). Здесь же проиллюстрирован графически и процесс определения лучшего варианта: различным значениям информативного параметра соответствуют разные уровни ФП,



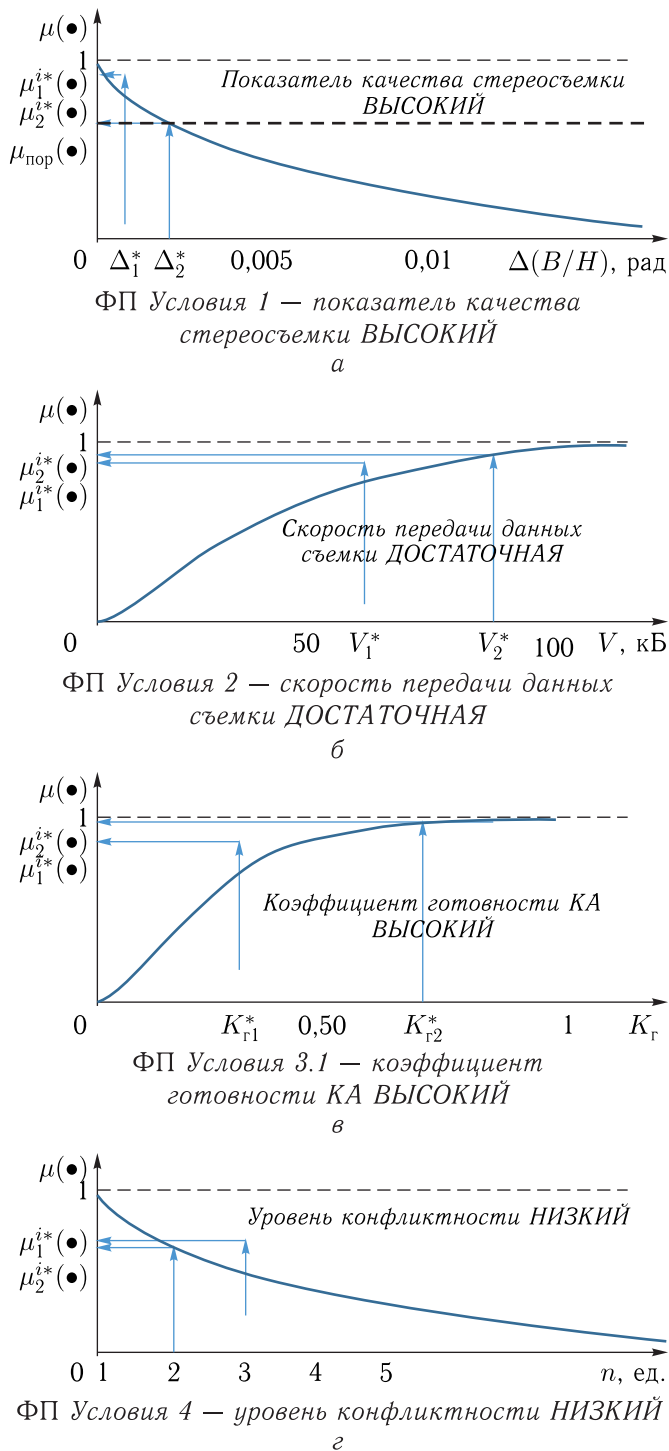


Рис. 4. Функции принадлежности условий принятия решения

а на рис. 4, а показан и пороговый уровень ФП, при превышении которого вариант считается приемлемым.

Исходя из размерности решаемой задачи на множестве из 5 КА общее число возможных сочетаний для реализации заданного ЦЭ — стереосъемки составляет  $C_5^2 = 10$  пар, например КА1–КА4. Осуществим выбор одного предпочтительного варианта на основании предложенного алгоритма.

Пусть получены значения всех информативных параметров, сведенные в табл. 3, в которой приведены и оценки ФП Условий 1–4 и выводы из оценок. Будем считать, что для всех условий задан пороговый уровень принятия решения  $\mu^*(\bullet) \geq \mu_{\text{тр}}(\bullet)$ , где  $\mu_{\text{тр}}(\bullet) = 0,7$ .

Последовательный анализ Условий 1–4 позволяет на первом этапе сократить число возможных структур с 10 до 8, но при этом в состав ОС входят все КА группировки, поэтому анализ выполнимости Условий 2–4 проводится для всей группировки. ОС и КА, не удовлетворяющие требованиям условий, выделены серым цветом. Как видно из табл. 3, происходит последовательное сокращение размерности возможных ОС с 10 до 1. Итоговая ОС для реализации ЦЭ стереосъемки включает КА3 и КА5.

### Заключение

В настоящей статье рассматривается общий алгоритм формирования рабочих структур при управлении МОГ, основанный на решении задачи многокритериального выбора с использованием нечеткой меры в виде функций принадлежности. Строгая формализация алгоритма возможна с использованием элементов формализации, введенных в постановке задачи на управление МОГ, рассмотренной в статье [3]. Практическая реализация предложенного алгоритма предполагает задание соответствующих множеств ЦЭ для МОГ, определения множеств Условий принятия решения и информативных параметров, а также видов функций принадлежности. Алгоритм формирования рабочих структур может являться составной частью комплекса задач командно-программного обеспечения, реализуемых в Центре управления полетом перспективными многоспутниковыми орбитальными группировками.

Таблица 3. Значения информативных параметров и оценки функций принадлежности

ОС		1-2	1-3	1-4	1-5	2-3	2-4	2-4	3-4	3-5	4-5
У1	$\Delta(B/H)$	0,001	0,002	0,007	0,000	0,004	0,003	0,008	0,002	0,001	0,005
	$\mu^*(\Delta(B/H))$	0,933	0,871	0,616	1,000	0,758	0,812	0,574	0,871	0,933	0,707
ОС 1		1-2	1-3		1-5	2-3	2-4		3-4	3-5	4-5
КА		1		2		3		4		5	
У2	V	95,000		60,000		85,000		100,000		90,000	
	$\mu^*(V)$	0,807		0,646		0,771		0,823		0,790	
У3	$K_r$	0,800				0,750		0,900		0,950	
	$\mu^*(K_r)$	0,975				0,969		0,984		0,988	
	$\nu_{PT}$	25,000				50,000		75,000		90,000	
	$\mu^*(\nu_{PT})$	0,580				0,823		0,926		0,956	
	$\epsilon_{ЭЭ}$	150,000				300,000		350,000		375,000	
	$\mu^*(\epsilon_{ЭЭ})$	0,646				0,875		0,912		0,926	
У4	$n$					1		2		0	
	$\mu^*(n)$					0,707		0,5		1	
КА		1		2		3		4		5	
Итоговая ОС		1-2	1-3	1-4	1-5	2-3	2-4	2-4	3-4	3-5	4-5

## Список литературы

1. Потюпкин А.Ю., Волков С.А., Пантелеймонов И.Н., Тимофеев Ю.А. Управление многоспутниковыми орбитальными группировками // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2020, т. 7, вып. 3. С. 61–70.
2. Жодзишский А.И., Жидкова С.К., Нагорных Д.Н. Построение единого наземного комплекса управления многоспутниковой группировки КА ДЗЗ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2020, т. 7, вып. 4. С. 45–56.
3. Потюпкин А.Ю., Волков С.А., Тимофеев Ю.А. Групповое управление многоспутниковой орбитальной группировкой на основе концепции режимов совместного функционирования // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2021, т. 8, вып. 3. С. 11–19
4. Прикладные нечеткие системы / Пер. с япон.; Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. М.: Мир, 1993. 368 с.
5. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 311 с.
6. Назаров А.Н., Сычев К.И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. Красноярск: Поликом, 2010. 389 с.
7. Макаренко С.И., Бородин Р.В. Анализ технологий обеспечения качества обслуживания в мультисервисных АТМ сетях // Информационные технологии моделирования и управления, 2012, № 1 (73). С. 65–79.
8. Аганесов А.В. Модель сети спутниковой связи на основе протокола случайного множественного доступа S-Aloha // Системы управления, связи и безопасности, 2015, № 2. С. 99–134.
9. Буранова М.А., Киреева Н.В. Технологии обеспечения качества обслуживания в мультисервисных сетях. Учеб. пособ. Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2016. 181 с.
10. Туманов А.В., Зеленцов В.В., Щеглов Г.А. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 572 с.
11. Потюпкин А.Ю., Данилин Н.С., Селиванов А.С. Кластеры малоразмерных космических аппаратов как новый тип космических объектов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, вып. 4. С. 45–56.